

## PROJECTE O TESINA D'ESPECIALITAT

**Títol**

**LA MÚSICA DE LOS PUENTES.**

**Autor/a**

**GUILLEM BALAGUÉ MARTÍN**

**Tutor/a**

**ANGEL CARLOS APARICIO BENGOCHEA**

**Departament**

**ENGINYERIA DE LA CONSTRUCCIÓ**

**Intensificació**

**ENGINYERIA DE CAMINS, CANALS Y PORTS**

**Data**

**MAIG 2014**

# LA MÚSICA DE LOS PUENTES



---

**Autor:** Guillem Balagué Martín

**Tutor:** Ángel Carlos Aparicio

**Titulación:** Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos

**Fecha:** Mayo 2014

## RESUMEN

**Título:** La Música de los Puentes

**Autor:** Guillem Balagué Martín

**Tutor:** Ángel Carlos Aparicio

La presente tesina pretende obtener la música inherente de diversas tipologías de pasarelas peatonales.

Se trata de realizar el análisis dinámico de las mismas ante el paso de un único peatón. Con las frecuencias, energía y desplazamientos resultantes a lo largo del tiempo en un punto en concreto de esta carga dinámica, realizaremos una amplificación lineal de estos valores para ajustarlos dentro del rango audible del ser humano.

Adaptando estos resultandos a la notación musical contemporánea, escribiremos las partituras de la música de los puentes; donde entrarán en juego otras variables además de las descritas, como el timbre de la pasarela, mediante el cual lo aproximaremos a un instrumento; el tempo utilizado y asignado a cada nota musical, entre otras.

Recorriendo en primer lugar algunos antecedentes en los que artistas, arquitectos e ingenieros han unido su disciplina a la música, escogeremos las alternativas adecuadas buscando una clara diferenciación en los elementos que entran en juego en el cálculo dinámico; y consecuentemente, en su música.

Estos elementos variarán en su masa, rigidez, amortiguamiento y geometría. De este modo, analizaremos tres alternativas de una pasarela en arco, dos de una pasarela atirantada y dos más de una pasarela pórtico; donde en cada una de estas tipologías variaremos la rigidez del tablero y la de otros elementos, así como sus materiales.

Previamente a realizar este análisis dinámico, dimensionaremos cada una de las alternativas siguiendo las indicaciones de diversas normativas estatales e internacionales para comprobar los estados límite de vibraciones y último de cada una.

## **ABSTRACT**

**Title: The Bridge's Music**

**Author: Guillem Balagué Martín**

**Supervisor: Ángel Carlos Aparicio**

This thesis aims to obtain the inherent music of some kinds of footbridges. The objective is to carry out a dynamic analysis while a single pedestrian is crossing these bridges, in order to obtain frequency, energy and bridge displacement through time and in a specific point of measurement. After, these results will be amplified by a single constant to be into the audible range.

Fitting these results to contemporary music appreciation, will allow us to write the sheets of music of each one, where we will have to considerate another variables in addition to previously described, such a bridge timbre by which we will approximate the footbridge to an instrument, tempo used and assigned to each musical note, among others.

First of all, we will describe some antecedents of artists, architects and engineers who their disciplines were joined with music in their works. Later, we will choose the alternatives following the premise that the elements that take part into the dynamic analysis, have to have differences in the outcomes, and consequently, in their music.

These elements will vary in their mass, stiffness, damping and structural geometry. In this way, we will analyze three alternatives from bow footbridge, two from cable-stayed footbridge and finally two from gantry footbridge, where in each of these the stiffness span and another elements will vary, as well as their materials.

Previously to make these dynamic analysis, we will define every single alternatives following the indications of Spanish and international regulations to check vibrations as service state limit and the ultimate limit state.

# ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN .....	5
2. INGENIERÍA Y MÚSICA: ACTUALIDAD.....	6
2.1 Esculturas sonoras.....	6
2.1.1 Estructuras decorativas sonoras por medios físicos .....	6
2.1.2 Estructuras decorativas sonoras por medios digitales.....	11
2.2 Estructuras funcionales sonoras .....	12
2.2.1 Estructuras con funcionalidad definida y que son sonoras por medios físicos.....	12
2.2.2 Estructuras con funcionalidad definida: traducción digital a la música.....	14
3. OBJETIVO .....	17
4. PRESENTACIÓN DE LAS ALTERNATIVAS .....	18
4.1 PASARELA EN ARCO.....	18
4.1.1 Tablero con poca rigidez .....	20
4.1.2 Tablero con alta rigidez .....	21
4.1.3 Arco con baja rigidez .....	23
4.1.4 Arco con alta rigidez.....	24
4.2 PASARELA ATIRANTADA.....	25
4.2.1 Sección ortótropa.....	27
4.2.2 Sección mixta .....	28
4.2.3 Cálculo tensado de los tirantes .....	32
4.3 PASARELA PÓRTICO.....	35
4.3.1 Tablero losa maciza de hormigón pretensado.....	36
4.3.2 Tablero aligerado de hormigón pretensado .....	37
5. CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES.....	39
5.1 HORMIGÓN .....	39
5.1.1 Resistencia a compresión .....	39
5.1.2 Módulo de elasticidad .....	39
5.1.3 Coeficiente de amortiguamiento .....	39
5.1.4 Coeficiente de dilatación térmica .....	39
5.2 ACERO.....	40
5.2.1 Resistencia.....	40
5.2.2 Módulo de elasticidad .....	40
5.2.3 Coeficiente de amortiguamiento .....	40
5.2.4 Coeficiente de dilatación térmica .....	40
6. DIMENSIONAMIENTO.....	41
6.1 ACCIONES CONSIDERADAS.....	41

6.1.1 Acciones permanentes de valor constante .....	41
6.1.2 Acciones permanentes de valor no constante .....	41
6.1.3 Sobrecarga de uso criterios de servicio .....	42
6.1.4 Sobrecarga de uso criterios resistentes .....	42
6.1.5 Acción del viento .....	43
6.1.6 Acción térmica .....	48
6.1.7 Nieve .....	49
6.1.8 Sismo .....	49
6.1.9 Accidentales .....	49
6.2 COMBINACIÓN DE ACCIONES .....	50
6.2.1 Estado Límite Último (ELU) .....	50
6.2.2 Estado Límite de Vibraciones en pasarelas peatonales .....	50
6.3 RESULTADOS OBTENIDOS DEL DIMENSIONAMIENTO .....	51
6.3.1 Pasarela en arco .....	51
6.3.2 Pasarela atirantada .....	53
6.3.3 Pasarela pórtico .....	55
7. DETERMINACIÓN DE LA MÚSICA DE LAS PASARELAS .....	57
7.1 DEFINICIÓN DE LA CARGA MÓVIL .....	57
7.2 RESPUESTA DINÁMICA .....	58
7.3 OBTENCIÓN DE LAS FRECUENCIAS Y ENERGÍA EN EL TIEMPO .....	58
7.4 AMPLIFICACIÓN DE LAS FRECUENCIAS Y ENERGÍA: RANGO AUDIBLE .....	62
7.4.1 Rango audible .....	62
7.4.2 Amplificación de frecuencias y energía .....	62
7.5 DEFINICIÓN DEL TIEMPO .....	64
7.6 TIMBRE DE LAS PASARELAS .....	66
7.7 REPRESENTACIÓN EN PARTITURAS .....	70
8. CONCLUSIONES .....	72
9. AGRADECIMIENTOS .....	73
10. BIBLIOGRAFÍA .....	74

#### ANEJO 1: TABLAS DE DIMENSIONAMIENTO

#### ANEJO 2: PARTITURAS

## 1. INTRODUCCIÓN

Siempre se ha relacionado la ingeniería civil en la proyección y construcción de estructuras o infraestructuras basándose principalmente en la funcionalidad y en la resistencia, dejando la parte estética y “artística” a la arquitectura.

Aunque, como expuso Gustave Eiffel, ingeniero civil: “¿No es cierto que las genuinas condiciones de fortaleza siempre cumplen las secretas condiciones de armonía?”, llegando así a establecer que la solución óptima para una construcción en términos resistentes lo era también desde un punto de vista estético, ya que la distribución fuerzas-resistencia estaba en perfecto equilibrio cumpliendo una armonía idílica.

Como sucede con la pintura, escultura y la fotografía; la arquitectura (e ingeniería civil) se considera arte estático, inmóvil, pues la interpretación del mensaje que transmite el emisor puede realizarse instantáneamente por parte del receptor.

Diferentes son, por ejemplo, el cine o la música; los cuales requieren de cierto tiempo de apreciación para poder interpretar el mensaje en su totalidad.

Una nueva manifestación, que ya existe en la arquitectura en diferentes modalidades, es proponerla de forma dinámica; expandiéndola así a nuevas formas de arte y expresión.

Podemos introducir una de estas formas por una cita de Novalis: “*La música es arquitectura en movimiento*”.

No podemos entender la humanidad sin música, el “arte dinámico” por excelencia: ¿sería posible trasladarlo a la obra civil y a la arquitectura como así ocurrió con la fotografía y la música para crear el cine?

La música es, en su fundamento, un conjunto de frecuencias ordenadas armónicamente y transmitidas al receptor mediante un medio (instrumento) determinado; al cual le puede producir ciertas emociones y sentimientos.

Las estructuras, cuando son impactadas por un factor externo, producen unas frecuencias que, aunque sean inaudibles para el oído humano, puede considerarse un “sonido”; o incluso, “música”.

En las últimas décadas han habido algunas construcciones cuyo objetivo, además del funcional y de servicio, es amplificar estas frecuencias resultantes de un impacto hacia un rango audible para el ser humano.

El ejemplo más claro son las “carreteras sonoras”, en las que a partir de “bandas sonoras” o modificaciones del firme, el paso de los vehículos produce una melodía armónica para el usuario.

Siempre hemos entendido la carretera como un medio para unir un origen y un destino, un significado lineal cuyo objetivo es reducir distancias y tiempos. De este modo, adquiere un nuevo significado, una nueva forma de entender el viaje como un placer más.

La presente tesina recorrerá algunos ejemplos de estructuras e infraestructuras audibles y de otras que, mediante alternativas en la amplificación de las frecuencias resultantes por acciones externas; obtenemos sonidos interpretables y en algunos casos, música.

El objetivo final, será obtener una pieza musical donde el instrumento es una estructura o un conjunto de éstas; concretamente como objeto de estudio en nuestro caso, diversas alternativas de pasarelas peatonales.

## 2. INGENIERÍA Y MÚSICA: ACTUALIDAD

No es nuevo unir temáticas tan diferentes como son las obras arquitecturas, ingenieriles o esculturas con la música. Existen numerosos ejemplos que han buscado esa sintonía única. Éstos se han basado en la creación de nuevas formas de producción del sonido, combinando elementos con funciones estructurales muy diferentes.

Hemos optado en clasificarlos en función de diferentes atributos, los cuales hemos definido a continuación:

### Según función estructural

- La estructura tiene una finalidad únicamente decorativa. Se puede definir como una “escultura musical”.
- La funcionalidad del elemento es estructural o pertenece a una infraestructura, donde se añade una función adicional que es la producción de sonido.

### Según producción del sonido

- A partir de la interacción del objeto y una sollicitación física (viento, agua, cargas peatonales...) el propio cuerpo del elemento, actuando como amplificador, realizará un sonido determinado, el cual está definido a partir de diferentes variables geométricas.
- A partir de la interacción del objeto y una sollicitación física, se determina cuales son las frecuencias resultantes y se realiza una amplificación (transformación digital).

Existen numerosos ejemplos que combinan las formas de producción de sonido y su función. A continuación se muestran algunos de ellos, siguiendo el esquema presentado.

### 2.1 Esculturas sonoras

#### 2.1.1 Estructuras decorativas sonoras por medios físicos

##### 2.1.1.1 Instrumentos Baschet

Los hermanos Baschet (n. 1924 y 1927) (**Casadevall 2008**) fueron los pioneros en la búsqueda de esculturas sonoras, las que definieron como “objetos diseñados para complacer al mismo tiempo a la vista y al oído”. Han tenido numerosos seguidores entre compositores y músicos experimentales, como los que presentaremos a continuación, los cuales fueron inspirados por estos hermanos.

Estos Luthieres, a partir de sus creaciones e invenciones, se preguntaron por qué había materiales que amplificaban más el sonido que otros.

Se definió entonces la impedancia acústica ( $Z$ ) que es el cociente entre la presión acústica ( $p$ ) y la velocidad ( $v$ ) de las partículas en dicho medio material.

Es decir, que cuanto más impedancia tenga un instrumento más amplificado resultará su sonido.

Buscaron, en primer lugar, mejorar los instrumentos que ya existían en su época, sin demasiado éxito puesto que no lograron mejorarlos en exceso.



Posteriormente, y rompiendo con los esquemas musicales que tenían presentes, reformularon la definición de *instrumento musical*. Llegando a la conclusión que un instrumento debía estar compuesto básicamente por los siguientes elementos:

- Un elemento de vibración periódica (cuerda, membrana...)
- Una forma de energía que active su vibración (viento, baqueta, arco...)
- Un sistema de regulación de la velocidad de la vibración (para implantar una escala musical; es decir, agujeros, teclas...)
- Un amplificador de la vibración (caja de resonancia, tubo/s...)

Estos hermanos trataron de "cocinar" un instrumento basándose fundamentalmente en que en una obra musical debe existir una base de **ritmo, melodía y fondo**.

En su tiempo se buscaba unir todos los instrumentos en familias definidas, pero gracias a su formulación únicamente "física", sólo era necesaria la imaginación del Luthier para crear cualquier instrumento, los cuales en muchas ocasiones podían llegar a ser "in-encasillables". En la figura 2.1 se muestra un ejemplo de ello:



**FIGURA 2.1:** Instrumento de los hermanos Baschet

Este instrumento consiste en una barra de metal pesada situada en el centro del mismo, en la que se introducen las vibraciones producidas por las varillas de metal (excitadas por percusión, frotamiento de arco con crin o arco de vidrio) y donde se añaden a éstas otro tipo de vibraciones (cuerdas de piano con uno de sus extremos libre y discos) (**Vidal-Quadras 2006**).

#### *2.1.1.2 Arpa Eolia: château de Comper*

El arpa eolia consiste en unas cuerdas que vibran con el viento y una caja de resonancia amplifica dicho sonido.

Existen varias arpas eolias hechas esculturas, como es el caso de la situada en el château de Comper (Bretaña Francesa) la cual se inspira en la historia de amor entre el mago Merlín y Viviane (hada del lago). El arpa, mostrada en la figura 2.2., está configurada por dos caras con tres cuerdas cada una y dedicadas al miembro de la historia, haciendo que en función de la dirección a la que el viento sople, sonará una melodía u otra; dando un mayor significado al relato y a la situación (**Martín 2013**)

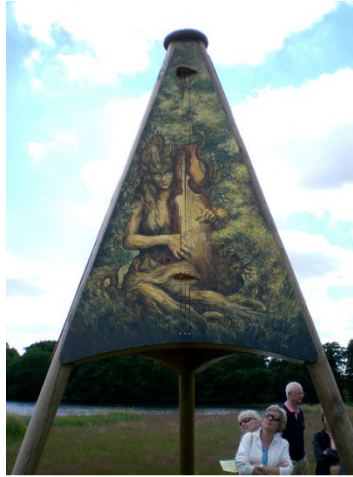


FIGURA 2.2: Arpa eolia en el château de Comper

### 2.1.1.3 Parque del viento

El parque del viento situado en Buenos Aires, Argentina y proyectado por Marcelo Ovadia y Gustavo Val, inaugurado en diciembre de 2005; es otro claro ejemplo de esculturas decorativas sonoras. En este caso, los elementos de vibración periódica (de acuerdo con la definición de los hermanos Baschet) son unos tubos sonoros (**Gorbat 2011**).

El núcleo del parque, lo constituye el Monumento del Centenario, un órgano eólico que lo envuelve en sus sonidos y armonías. Este órgano está compuesto por tres torres: la oeste “torre de América”, la sur “torre de Europa” y la norte “torre del Río de la Plata”. Según la dirección del viento (tres predominantes Norte, Este y Sudeste) el órgano en su conjunto genera distintas armonías y a su vez cada una de las torres origina una cualidad armónica específica, esto produce unas percepciones acústicas variables según los recorridos que tomen los paseantes. En la figura 2.3. puede observarse el aspecto de dicha estructura.



FIGURA 2.3.: Monumento del Centenario, Argentina.

Cada tubo produce, de acuerdo a su tamaño de largo, un tono fundamental<sup>1</sup>, una frecuencia determinada. Cuando la intensidad del viento sea mayor sobreexcitará al sistema, produciéndose, de esta manera, armónicos del tono fundamental y/o sonidos multifónicos<sup>2</sup>. Cuando la intensidad del viento sea menor subexcitará al sistema.

<sup>1</sup> Armónicos según el sistema de afinación estándar que forman una escala logarítmica la cual empieza con el 1er tono fundamental en 8.16 Hz. (**Estévez 1990**)

<sup>2</sup> Producción simultánea de varias notas (notas) en el que el resultado es un sonido armónico. Sinónimo de “acorde”.

La disposición geométrica de los tubos será la que defina las notas de la estructura. En este caso, para cada una de las tres torres, se ha seleccionado una distribución de las notas (tonos y semitonos) diferentes; basándose en las estructuras armónicas "Constelación Planetaria" y "Constelación Estelar", las cuales están definidas por un rango de intervalos de frecuencias.

La torre Europa, por ejemplo, tomó como base la constelación planetaria, que fue utilizada para la elaboración de la distribución de sus tubos. Dicha distribución se muestra en la siguiente figura 2.4.:

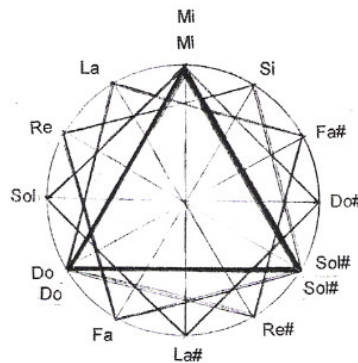


FIGURA 2.4: Distribución de intervalos de frecuencias definidos como "Constelación planetaria".

Donde pueden observarse tres sonidos relacionados entre sí por una  $3^a$  mayor (Do, Mi y Sol#; un intervalo de 2 tonos), más la duplicación de esos sonidos y sus relaciones.

Las relaciones sonoras fueron materializadas en un conjunto de doce tubos -seis tonos fundamentales duplicados- para cada una de las tres direcciones de viento. En total, la torre Europa tiene 36 tubos.

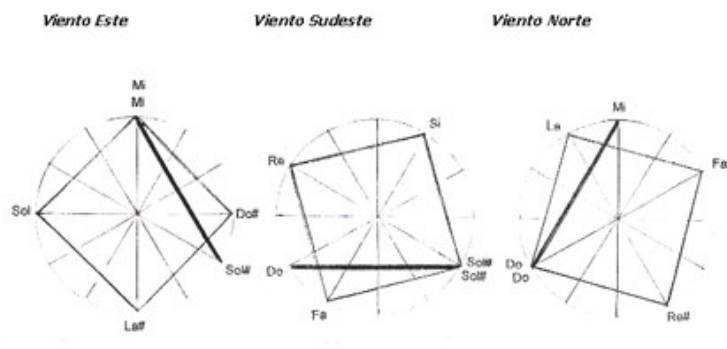


FIGURA 2.5: Notas en las que la Torre Europa elaborará la melodía según la dirección del viento.

En la siguiente figura 2.6 se puede observar la torre Europa, donde podemos apreciar la diferenciación entre tubos.

<sup>3</sup> En música, la forma de definir los intervalos entre notas, se denota a partir de esta estructura (p.eg quinta + justa: intervalo de 3,5 tonos; segunda menor: 0,5 tonos).



FIGURA 2.6: Vista de la torre Europa en el paseo del viento.

Las otras dos torres (torre América y torre Río de la Plata) están definidas siguiendo la misma filosofía que la torre Europa; pero en este caso siguiendo la distribución estelar, la cual se puede observar en la siguiente figura 2.7:

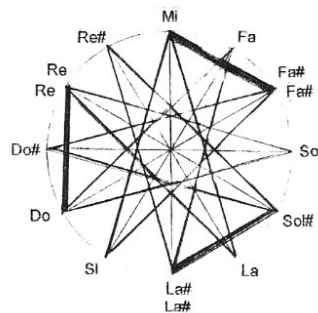


FIGURA 2.7: Distribución de notas que forman la constelación estelar.

El motivo de estas distribuciones musicales es que sobre ellas se han formado la gran mayoría de melodías tradicionales de la zona (o continente) del que dan el nombre cada una de las torres. Es decir, que las melodías tradicionales de Europa, por ejemplo, siguen una distribución como la mostrada en la figura 2.7.

#### 2.1.1.4 Singing Ringing Tree

A partir del mismo elemento (tubos) y del medio (viento), encontramos otro ejemplo, el Singing Ringing Tree (**Panopticons 2008**).

Situado en Inglaterra y diseñado por Tonkin Liu e inaugurado en 2006, consiste en una gran estructura formada únicamente por tubos sonoros, como puede observarse en la figura 2.8



FIGURA 2.8: Singing Ringing Tree

### 2.1.1.5 Puente Xilófono de Japón

Hasta ahora hemos visto diferentes 'esculturas' en las que el viento es la forma de energía que activa su vibración propia y donde produce un sonido gracias a la impedancia del material del que están hechos.

Otro medio que puede provocar esta vibración es la percusión, como lo hace el “puente xilófono” realizado en Japón para un anuncio de una marca de móviles. Consiste básicamente en una esfera bajando (con únicamente un impulso inicial y la propia fuerza gravitatoria) por el puente formado por distintas teclas de diferente dimensión. **(Nora 2011)**

El avance de la esfera por las mismas va produciendo una melodía, concretamente la Cantata 147 de Bach . De forma que, definiendo las variables geométricas de cada pieza, se consiguen unas determinadas notas y ritmos.

La superficie de cada pieza (longitud x anchura) define una nota característica (frecuencia) que suena cuando la esfera golpea en la misma.

La longitud y la altura entre piezas definirán el ritmo, ie: el tiempo en que la esfera va golpeando cada pieza.

En la figura 2.9. puede observarse una captura de dicho anuncio.



FIGURA 2.9.: Imagen del anuncio en el que aparece el puente xilófono.

## 2.1.2 Estructuras decorativas sonoras por medios digitales

### 2.1.2.1 Artistas experimentales en las instalaciones sonoras

Durante el segundo tercio del siglo veinte **(Metzger 2000)** han existido numerosos artistas que, en la búsqueda de nuevas formas de arte, han experimentado con las llamadas “instalaciones sonoras”. Artistas como Max Neuhaus realizaron obras muy poco comunes, como la que realizó en la ciudad de Nueva York.

Dicha obra consistía en recibir la frecuencia producida por las actividades cotidianas (vehículos, ascensores, conversaciones...) en un cierto radio de la ciudad de Nueva York, traduciéndola a una melodía y a unos ritmos, y finalmente transmitiéndola por radio a los ciudadanos.

De esta forma, según el ritmo al que estuviese la ciudad, esta melodía sonaba con un ritmo más rápido o más lento, más “alegre” o menos. Por tanto, el significado era que la ciudad era la propia “pieza musical”: su modo de amplificación, su instrumento. Existen otros muchos artistas que aplican este concepto de transformación digital de cualquier frecuencia, en sonido (y quizás, en música).

### 2.1.2.2 Sounds of the Sun

Aplicando este concepto en un medio más físico (y no tan abstracto) encontramos otros artistas que han elaborado esculturas muy interesantes. Michael Jantzen es un arquitecto conceptual que ha realizado numerosos diseños y edificios siempre marcados por la búsqueda de la originalidad. Uno de ellos, Sounds of the Sun **(Jantzen 2012)**, consiste en una propuesta

de escultura formada por diversos tubos, como se puede observar en la figura 2.10., los cuales disponen de una células solares que traducen la energía producida por el sol en sonido, en función del movimiento aleatorio de la luz sobre la superficie de la estructura. Este sonido se transmite por unos altavoces situados en la base de la misma para que el visitante lo oiga.



FIGURA 2.10.: Sounds of the Sun, por Michael Jantzen

En este caso, por tanto, la forma energética que active la vibración de dicho “instrumento” es el sol.

## 2.2 Estructuras funcionales sonoras

Anteriormente hemos mencionado diversas “esculturas” que poseen una finalidad únicamente decorativa, donde se incluye un “efecto sonoro”. Existen también estructuras o infraestructuras, que aparte de su función principal, también tienen la sonora. Existen varios ejemplos que mostraremos a continuación.

### 2.2.1 Estructuras con funcionalidad definida y que son sonoras por medios físicos

#### 2.2.1.1 Puerto de Zadar

El órgano marino del puerto de Zadar, proyectado por Dalmatian Stone Carvers y el arquitecto Nikola Basic en 2005, es uno de los ejemplos en los que está más clara la unión entre ingeniería civil y música (Vicic 2009).

Esta estructura incorpora en su interior un mecanismo de tubos que transforma en sonidos el aire empujado por las olas. En la figura 2.11. puede observarse las secciones en planta y en perfil de la estructura.

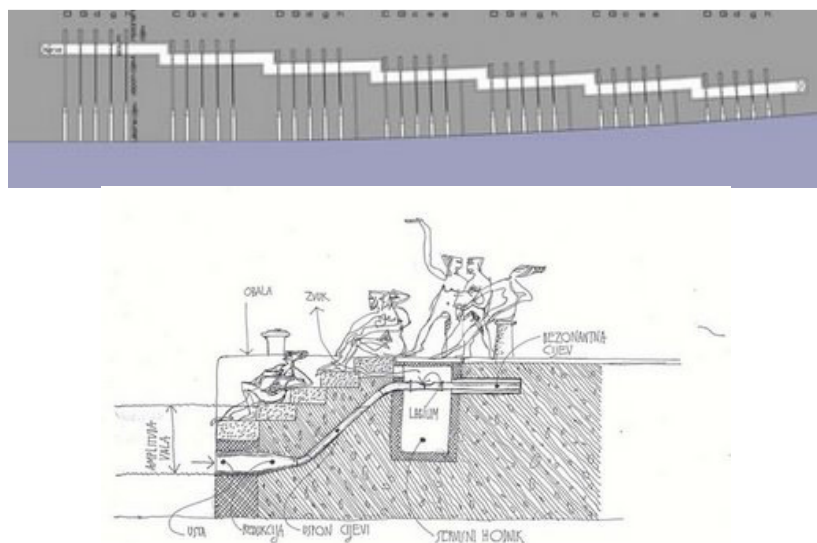


FIGURA 2.11: Planta y sección del órgano de mar de Zadar



Los vaivenes del mar hacen que los tubos de plástico sumergidos en el agua, expulsen y aspiren aire. En función de la longitud y anchura de dichos tubos y orificios, se producirá una determinada nota. Cuanto más largos sean, producirán sonidos más agudos mientras que cuanto más cortos, más graves.

Debajo del primer escalón encontramos las aberturas por donde se crea el sonido. Son tubos perpendiculares al que está en contacto con el mar.

Los 7 grupos sucesivos de tubos se templan alternativamente a dos acordes de la escala principal diatónica<sup>4</sup>. Podemos observar el primero como re sol si sol si y el segundo como do sol do mi la, creando así un acorde perfectamente armónico (**Casadevall 2007**).

Un oyente sentado en la escalinata debería ser capaz de oír de 5 a 7 tubos.

El resultado es una melodía misteriosa que inspira intranquilidad cuando el mar es revoltoso y tranquilidad cuando está calmado. La melodía pocas veces resultará igual, puesto que el oleaje, y más en aguas poco profundas, resulta muy poco uniforme en la mayoría de ocasiones.

Se consigue de esta forma que el usuario del propio puerto tenga un mayor lazo con el mar y su dinámica.

### 2.2.1.2 Carreteras sonoras

Otro ejemplo muy ilustrativo son las llamadas carreteras sonoras. En este caso, el sonido es producido por el paso del vehículo sobre la calzada, en el que tiene una rugosidad y textura especial (de las que ya se realizan para avisar al conductor cuando se desvía de su carril) que a partir de las distancias y amplitudes provocan diferentes sonoridades y notas que puede traducirse a una melodía. La velocidad de esta melodía, el ritmo, vendrá regulada, consecuentemente, por la propia velocidad de los vehículos.

La primera **carretera musical**, conocida como Asphaltophone, fue fundada en Dinamarca en octubre de 1995 en el proyecto participo el artista Steen Jensen Krarup y Jakob Freud-Magnus. En Japón existen tres **carreteras con melodía**, cada una de ellas tiene una longitud de unos 400 kilómetros (**Rincón Abstracto 2012**). Una de ellas está ubicada en Hokkaido, y las otras dos - en la isla de Honshu, en las prefecturas de Wakayama y Gunma.

Uno de los objetivos iniciales de estas carreteras era evitar faltas de distracción al volante (evitar una conducción monótona); aunque finalmente han sido un reclamo turístico importante.

Actualmente existen estas carreteras en Japón, Corea del Sur, Dinamarca y los EE.UU.



FIGURA 2.12: Carreteras musicales

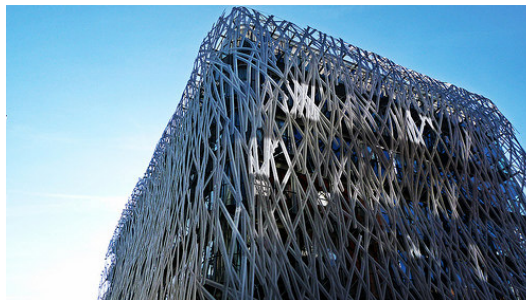
<sup>4</sup> Escala musical formada por intervalos de dos notas que están separadas por un tono (escala mayor; p.ej: do, re, mi...) o por un semitono (escala menor; p.ej: do, do#, re, re#, mi...).

### **2.2.2 Estructuras con funcionalidad definida: traducción digital a la música**

De la misma forma que a partir de diversas esculturas se traducían el medio físico (que puede llegar a ser hasta solar) en música a partir de medios digitales, también podríamos realizar lo mismo para obras civiles. Por ejemplo, transformando en sonido de forma digital desde el paso de peatones por una pasarela, un tren por un viaducto, hasta el viento o el movimiento del agua.

#### **2.2.2.1 Fachada sonora de Nantes**

A partir de un elemento estructural típico en edificación como es la fachada, Rolf Julius (**Andueza 2010**) realizó una fachada “sonora” de un edificio en Nantes, Francia, donde puede verse en la figura 2.13.



**FIGURA 2.13:** Fachada sonora en Nantes por Rolf Julius

Mediante unos sensores colocados en la propia fachada, se traducían la frecuencia producida por el sol y el viento por notas musicales; las cuales podían escucharse mediante unos altavoces situados a pie del edificio.

#### **2.2.2.2 Música en las vibraciones.**

Las estructuras tienen una frecuencia de oscilación propia, determinada por su geometría y su tipología estructural.

Las sobrecargas producen unos desplazamientos que aceleran la estructura. Si la frecuencia media de oscilación es 'muy pura' y cercana a la frecuencia de oscilación propia, se corre el riesgo que la estructura entre en resonancia.

El caso más emblemático fue el **puente de Tacoma (Crowell 1998)**, en el que la frecuencia media producida por el viento lateral coincidió con la frecuencia de oscilación propia del puente, produciendo el colapso del mismo. Queda remarcado, por tanto, que el estudio de las frecuencias de la estructura es fundamental en su diseño.

Como se realizó en la fachada musical de Nantes, estas frecuencias producidas por las sobrecargas (viento, temperatura, paso de peatones, vehículos...) pueden amplificarse de forma equitativa hasta el rango audible para el ser humano y escuchar qué tipo de sonidos o melodías produce.

Este rango audible, también llamado espectro audible o campo tonal, está comprendido entre los 20 Hz y 20 KHz (**Estévez 1990**).

La relación que existe entre frecuencia y notas musicales ha sido muy variada a lo largo de la historia.

En el siglo XVII, Johann Sebastian Bach escribió "Clave bien temperado", nombre dado a los dos ciclos de preludios y fugas en los que aparecían todas las tonalidades mayores y menores



de la gama cromática (**Mattheus 1972**). Fue el primero en utilizar una relación matemática entre las notas: mediante una relación logarítmica, definió qué frecuencias correspondían a cada nota musical para que éstas resultasen ser armónicas; dividiéndolas además en diferentes octavas donde cada una de ellas estaba comprendida por 12 notas cromáticas.

En la siguiente tabla 2.1., se puede observar qué frecuencia se le asigna a cada nota musical en la clave bien temperada de Bach:

OCTAVA -2			OCTAVA -1			OCTAVA 0		
NOTA	Nº	HZ	NOTA	Nº	HZ	NOTA	Nº	HZ
DO	0	8.18	DO	12	16.35	DO	24	32.70
DO#	1	8.66	DO#	13	17.32	DO#	25	34.65
RE	2	9.18	RE	14	18.35	RE	26	36.71
RE#	3	9.72	RE#	15	19.45	RE#	27	38.89
MI	4	10.30	MI	16	20.60	MI	28	41.20
FA	5	10.91	FA	17	21.83	FA	29	43.65
FA#	6	11.56	FA#	18	23.12	FA#	30	46.25
SOL	7	12.25	SOL	19	24.50	SOL	31	49.00
SOL#	8	12.98	SOL#	20	25.96	SOL#	32	51.91
LA	9	13.75	LA	21	27.50	LA	33	55.00
LA#	10	14.57	LA#	22	29.14	LA#	34	58.27
SI	11	15.43	SI	23	30.87	SI	35	61.74

OCTAVA 1			OCTAVA 2			OCTAVA 3		
NOTA	Nº	HZ	NOTA	Nº	HZ	NOTA	Nº	HZ
DO	36	65.41	DO	48	130.81	DO	60	261.63
DO#	37	69.30	DO#	49	138.59	DO#	61	277.18
RE	38	73.42	RE	50	146.83	RE	62	293.66
RE#	39	77.78	RE#	51	155.56	RE#	63	311.13
MI	40	82.41	MI	52	164.81	MI	64	329.63
FA	41	87.31	FA	53	174.61	FA	65	349.23
FA#	42	92.50	FA#	54	185.00	FA#	66	369.99
SOL	43	98.00	SOL	55	196.00	SOL	67	392.00
SOL#	44	103.83	SOL#	56	207.65	SOL#	68	415.30
LA	45	110.00	LA	57	220.00	LA	69	440.00
LA#	46	116.54	LA#	58	233.08	LA#	70	466.16
SI	47	123.47	SI	59	246.94	SI	71	493.88

TABLA 2.1.: Nota – frecuencia asignada.

La expresión utilizada para determinar cada nota es la siguiente:

$$f(n, o) = 440 \cdot e^{\left((o-3) + \frac{n-10}{12}\right) \cdot \ln 2}$$

Siendo  $o$  la octava utilizada (superior a 1) y  $n$  la nota en concreto (1 es Do, 2 es Do#, 3 es Re... Sucesivamente hasta 12 (Si)).

Prácticamente toda la música contemporánea ha seguido y sigue este patrón definido en la ilustración, el cual tiene su cénit en el "la3" o "la" central (440 Hz). Tan instaurada está en la concepción humana esta clave bien temperada, que una nota que no cumpla con esta relación, nos produce una sensación "disonante" o de desafinamiento.

Tomando estos conceptos, el Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos **Javier Rui-Wamba Martija (2008)**, midió las frecuencias que producía el paso de un ferrocarril en un viaducto. Las amplificó uniformemente (mediante una constante igual a 91) y mediante la clave bien temperada de Bach las "tradujo" a notas musicales.

Puede observarse en la siguiente tabla 2.2. las frecuencias que midió:

Excitación	Vano	Frecuencias medias medidas (Hz)
Tren 60 km/h	Central	5.25; 7.63
Locomotora 45 km/h	Central	5.44; 6.25; 6.38; 7.19
Tren 60 km/h	Lateral	7.75; 9.06
Tren 60 km/h	Lateral	7.75; 9.065
Locomotora 60 km/h	Lateral	9
Locomotora 60 km/h	Lateral	9
Viento	Lateral	6.31

TABLA 2.2.: Frecuencias producidas a un puente por diferentes tipos de solicitaciones.

Y seguidamente las tradujo a notas musicales, usando la relación implementada en el calve bien temperado de Bach:

Frecuencias medias Medidas	Frecuencia Ampliada	Nota Musical	Relación de Frecuencias Medidas	Relación Temperada de Bach
9.00	819.00	SOL#	1.65	1.68
7.75	705.30	FA	1.42	1.41
7.19	654.30	MI	1.32	1.33
6.31	574.20	RE	1.16	1.19
5.44	495.00	SI	1.00	1.00

**TABLA 2.3.:** Transformación de las frecuencias medidas.

Concluyendo, el uso que ha tenido el viaducto o puente ha sido la del instrumento, el cual mediante una acción exterior como el tren o el viento ("el músico"), produce unas frecuencias y mediante una amplificación se obtienen unos sonidos o notas; y combinándolos armónicamente, música.

De hecho, desde un punto de vista sinestésico<sup>5</sup>, cualquier fenómeno que entra en contacto con una estructura, puede traducirse por un sonido o nota musical; resumiendo así que todo dinamismo es *música*.

<sup>5</sup> Sinestesia: En neurofisiología, la **sinestesia** (del griego συν-, 'junto', y αἴσθησις, 'sensación') es la percepción conjunta o interferencia de varios tipos de sensaciones de diferentes sentidos en un mismo acto perceptivo.

### 3. OBJETIVO

El objetivo principal de la presente tesina es la obtención de diversas piezas musicales, cada una de ellas generadas por 7 alternativas de pasarelas peatonales; las cuales están sometidas a una sobrecarga dinámica móvil (un peatón).

Esta acción dinámica móvil en el tiempo  $F(x, t)$ , producirá una determinada respuesta dinámica a la pasarela; la cual dependiendo de diferentes parámetros, obtendremos unas frecuencias, energías y amplitudes determinadas cuya variabilidad en el tiempo nos darán una pieza musical en concreto.

La respuesta que presenta un elemento a una acción dinámica cumple la siguiente relación:

$$m \cdot \ddot{x} + c \cdot \dot{x} + k \cdot x = F(x, t)$$

Donde  $m$  es la masa,  $c$  el coeficiente de amortiguamiento,  $k$  la rigidez y  $x$  el desplazamiento del elemento ante una fuerza dinámica  $F(x, t)$ . La diferencia de estos parámetros entre alternativas hará que obtengamos diferentes piezas musicales.

Estas alternativas están divididas de la siguiente forma:

Tipo pasarela	Tipo elementos
Pasarela en arco	Tablero poco rígido, arco rígido
	Tablero rígido, arco poco rígido
	Tablero y arco poco rígido.
Pasarela atirantada	Tablero ortótropo
	Tablero mixto
Pasarela pórtico	Losa pretensada maciza
	Losa pretensada aligerada

**TABLA 3.1.:** Alternativas

En el nivel "tipo de pasarela" diferenciamos la geometría de la pasarela. En el nivel "tipo de elementos" variamos la rigidez, masa y coeficiente de amortiguamiento.

En un primer momento, dimensionaremos cada una de las alternativas para que se adecúen a los estados límite de servicio y de resistencia. Posteriormente, determinaremos las frecuencias en el tiempo que produce el paso del peatón; además de la energía a la que se desplaza la pasarela y la amplitud relativa en la onda de desplazamiento.

Mediante estos resultados, no sólo obtendremos una serie de notas en el tiempo, sino también cuál es su duración, a qué potencia relativa suenan y a qué instrumento se asemeja más cada una de las alternativas.

## 4. PRESENTACIÓN DE LAS ALTERNATIVAS

A continuación, presentaremos las tipologías de pasarelas consideradas para lograr nuestro objetivo. Hemos propuesto 3 tipos diferentes de esquemas geométricos; y dentro de cada uno de éstos, entre 3 y 2 alternativas posibles en el tablero.

Para comparar resultados entre las mismas, hemos considerado establecer dos parámetros geométricos, los cuales serán idénticos para todas las pasarelas, que son la longitud total de la pasarela de 100 metros y el ancho del tablero de 4 metros.

Cabe destacar que, en la proyección de pasarelas peatonales, suelen imperar más los criterios estéticos que los funcionales; especialmente si éstas son de frecuente concurrencia; convirtiéndolas, en muchos casos, en esculturas en vez de pasarelas.

Puesto que nuestro objetivo tiene una finalidad más artística que funcional, estos antecedentes nos justifican en parte la libertad en la definición de nuestras alternativas, por lo que podrían ser perfectamente proyectadas y construidas en un entorno real.

Para el dimensionamiento de las pasarelas nos basaremos en un dominio bidimensional, por lo que consideraremos irrelevante los efectos de torsión producidos; aunque como podrá observarse, la geometría de las secciones transversales consideradas reducirán estos posibles efectos.

### 4.1 PASARELA EN ARCO

Los puentes y pasarelas en arco son una de las tipologías de puente más antiguas que existen. Los primeros que se construyeron datan de la época de la Antigua Grecia y se realizaban básicamente de piedra. Posteriormente, los romanos emplearon mampostería y cemento para su construcción. Un ejemplo es el puente Alcántara, construido por los romanos en el año 104:

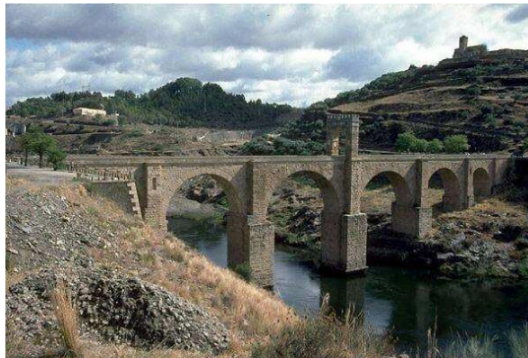


FIGURA 4.1. Puente de Alcántara. Año 104.

Resultan sorprendentes los conocimientos de mecánica y física que ya poseían los babilonios y los griegos, puesto que el arco resulta óptimo en la distribución de las reacciones y esfuerzos estructurales al tener una forma anti-funcular.

Cuando las técnicas y los materiales empleados han ido mejorando durante los últimos siglos; de este tipo de puente han surgido otras tipologías; como el puente pórtico, los puentes con arco inferior o intermedio, puentes en ménsula, etc. También los materiales empleados han variado, pasando de la roca al hormigón y a la estructura metálica.

Resulta atractiva la idea de obtener "la música" de este tipo de puente, con tantos siglos de historia, por lo que lo hemos incluido como una de nuestras alternativas.

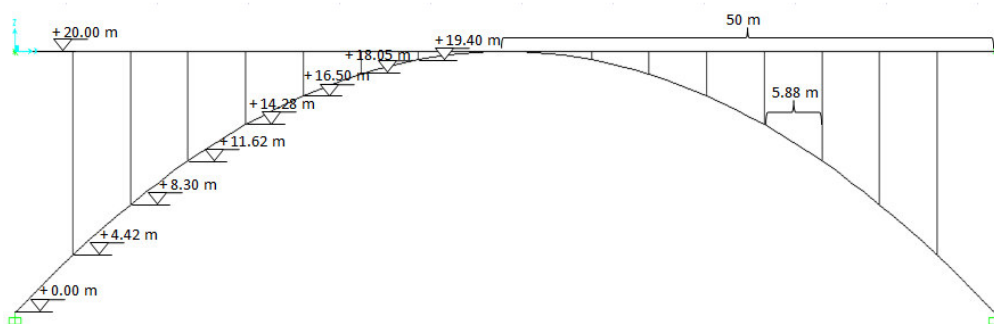
El esquema estructural que hemos considerado, se asemeja a una proyección bidimensional de la pasarela Ripshorts, situada en Schlaich (**Manterola 2012**); donde puede observarse en la figura 4.2:



**FIGURA 4.2.** Pasarela Ripshorts.

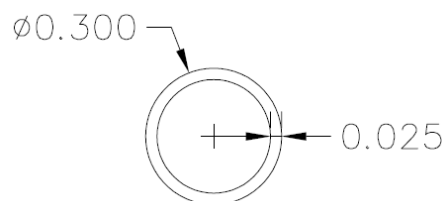
Se trata de una pasarela cuyo arco está situado por debajo del tablero; el cual, es completamente el antifunicular a la directriz de las cargas permanentes; a pesar de que su geometría haga pensar que está situado totalmente al azar.

Obtenemos así la geometría siguiente:



**FIGURA 4.3.:** Esquema estático pasarela en arco. Cotas y características.

Las pilas verticales que unen el arco y el tablero serán circulares, huecas y metálicas; las cuales para realizar el predimensionamiento hemos tomado los siguientes atributos:



**FIGURA 4.4.:** Sección de las pilas verticales de la pasarela en arco

Sección pila ortótropa	
Atributo	Valor
Área (m <sup>2</sup> )	0.022
Área cortante (m <sup>2</sup> )	0.011
$v$ (m)	0.150
$I_z$ (m <sup>4</sup> )	0.000
$W_e$ (m <sup>3</sup> )	0.001
Peso Propio (kN/m)	1.727

**TABLA 4.1.:** Atributos sección de las pilas verticales de la pasarela en arco

La clase de esta sección es de tipo 1; por lo que podremos aplicar el cálculo bajo condiciones plásticas. Plantearemos para este caso tres alternativas donde variaremos las rigideces del arco y del tablero:

- Tablero poco rígido y arco rígido.
- Tablero rígido y arco poco rígido
- Tablero y arco con rigidez similar.

De esta forma, la respuesta dinámica obtenida será diferente en cada caso debido a la variación de la rigidez de los elementos que la conforman.

La rigidez queda determinada en base al módulo de elasticidad (escogiendo hormigón, acero o ambos), a la inercia y al área de la sección (en base a la geometría de ésta). La definición utilizada "poca rigidez" se establece relativamente entre alternativas.

Además, la poca luz máxima del tablero (5.88 m) nos permite tener mucha libertad en la sección transversal a escoger; ya que las relaciones canto/Luz ( $c/L$  en adelante) serán elevadas por muy esbelta que sea la sección (del orden  $1/6$  a  $1/10$ ).

#### 4.1.1 Tablero con poca rigidez

Lo hemos definido como aquél que cumple para ser una sección de clase 3, y así evitar posibles problemas de abolladura locales.

Por tanto, para que resulte que la sección del tablero sea de clase 3 debemos disponer de un espesor superior de 40 mm y uno inferior de 25 mm; mientras que los laterales tomaremos el espesor mínimo exigido, de 10 mm.

Comprobaremos ahora si con estos espesores de chapa la sección cumple bajo criterios resistentes.

Si resultase estar sobredimensionado por el estado límite de servicio y necesitásemos disminuir la clase de la sección hasta la 4; omitiremos el cálculo de sección efectiva, siempre y cuando el aprovechamiento de la sección no sea superior al 85% para tener un margen de seguridad.

Si esta pasarela fuese proyectada, sería necesario dimensionar rigidizadores longitudinales adecuados para reducir los efectos de abolladura local.

Para determinar el axil, cortante y momentos de diseño en este predimensionamiento; hemos definido en el programa de cálculo unas cargas estimadas del peso propio, cargas permanentes y sobrecargas de uso, las cuales serán las determinantes.

El peso propio queda determinado en base a la área aproximada de la sección (unos  $0.25 \text{ m}^2$ ) y el peso específico del acero ( $78.5 \text{ kN/m}^3$ ); es decir, una carga de  $19.63 \text{ kN/m}$ . Por otro lado, las cargas permanentes tendrán un valor de  $4 \text{ kN/m}$  y las sobrecargas de uso de  $20 \text{ kN/m}$  y una puntual del 10% del total de las sobrecargas verticales. Se ha considerado como más desfavorable la hipótesis en que las sobrecargas de uso únicamente actúan en un lado simétrico de la pasarela (ver dimensionamiento).

Bajo esta combinación resistente, observamos que la sección cumple sobradamente en su estado límite último siguiendo las indicaciones de la EAE (ref.):

Tipo clase sección en momento positivo	Clase 3
Tipo clase sección en momento negativo	Clase 3

	Cálculo	Resistente	Aprovechamiento de la sección	Comentario
Axil (kN)	-0.13	79875.00	0.00%	Correcto
Cortante (kN)	334.94	5701.60	5.87%	Correcto
Momento positivo (kNm)	1117.93	298373.92	0.37%	Correcto
Momento negativo (kNm)	-330.14	-135815.89	0.24%	Correcto
Axil + Mom clase 3 (K1/K2)	0.00	1.00	0.37%	Correcto
Axil + Cortante + Momento (K1/K2)	0.06	0.50	11.75%	Correcto
Pandeo (kN)	-0.13	83767.46	0.00%	Correcto

TABLA 4.2.: Comprobación resistente sección predimensionada para el tablero de poca rigidez.

Por tanto consideraremos en primer lugar previo al dimensionamiento la siguiente sección:

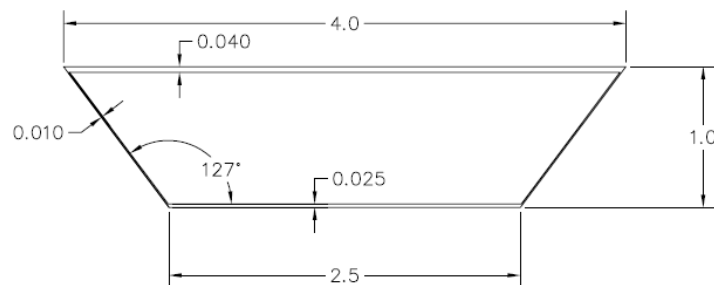


FIGURA 4.5.: Sección del tablero con baja rigidez, ortótropa. Cotas en metros.

Y tendrá los siguientes atributos:

Sección ortótropa en cajón	
Atributo	Valor
Área (m <sup>2</sup> )	0.245
Área cortante (m <sup>2</sup> )	0.025
$v_{inf}$ (m)	0.687
$v_{sup}$ (m)	0.313
$I_z$ (m <sup>4</sup> )	0.304
$W_{e,z,+}$ (m <sup>3</sup> )	0.972
$W_{e,z,-}$ (m <sup>3</sup> )	0.442
$I_y$ (m <sup>4</sup> )	0.045
$W_{e,y}$ (m <sup>3</sup> )	0.023
Peso Propio (kN/m)	19.23

TABLA 4.3.: Atributos sección de tablero con baja rigidez.

#### 4.1.2 Tablero con alta rigidez

El tablero con alta rigidez será prácticamente idéntico al de baja rigidez, pero en este caso consideraremos unos rigidizadores, con lo que se traducirá a un incremento de resistencia al pandeo y un aumento del área.

Tomando las definiciones expuestas en bibliografía específica (**Manterola 2006**); los rigidizadores deben estar separados como máximo  $60 \cdot t$  en la chapa en compresión o  $120 \cdot t$  en la chapa en tracción, siendo  $t$  el espesor de la chapa. Siguiendo estas indicaciones, en el peor de los casos obtendremos una separación máxima de 2.4 m; que es considerando un único rigidizador tanto a la chapa inferior como superior.

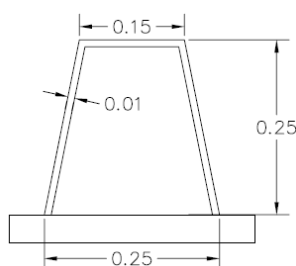


Consecuentemente, si queremos una diferencia más pronunciada entre la sección rígida y la poco rígida, deberemos considerar un mayor número de rigidizadores.

Observando otros antecedentes en pasarelas urbanas; como la pasarela de Andonain (**Pedelta 2008**), disponía de 3 rigidizadores para un ancho de 2.6 metros en chapa superior y de 2 para la inferior con un ancho de 1.9 m. Esto implica que aproximadamente se dispuso de 1 rigidizador por metro de ancho.

Haciendo una interpolación para nuestro caso, dispondremos de 4 rigidizadores en la chapa superior y de 2 en la inferior.

Las dimensiones y la forma de los rigidizadores las hemos definido tomando los valores estándar expuestos en bibliografía específica (**Manterola 2006**), donde siempre hemos tendido a tomar los valores para lograr una mayor rigidez. En la siguiente figura 4.6 se muestra la forma de los rigidizadores que consideraremos:



**FIGURA 4.6:** Sección de los rigidizadores utilizados. Cotas en metros.

Como en el programa de cálculo introduciremos los valores genéricos de la sección, consideraremos unos espesores de chapa equivalentes.

Para la chapa superior, con 4 rigidizadores, el área de éstos es de  $0.0264 \text{ m}^2$ , los cuales distribuidos en los 4 metros de ancho obtenemos un espesor equivalente de 6.6 mm; el cual se sumará a los 40 mm de chapa.

Por lo que hace la inferior, obtenemos un espesor equivalente de 5.28 mm; los cuales se sumarán a los 25 mm de chapa.

Esta nueva sección cumple con los criterios resistentes:

Tipo clase sección en momento positivo	Clase 3
Tipo clase sección en momento negativo	Clase 3

	Cálculo	Resistente	Aprovechamiento de la sección	Comentario
Axil (kN)	-0.13	92671.14	0.00%	Correcto
Cortante (kN)	334.94	5701.60	5.87%	Correcto
Momento positivo (kNm)	1117.93	335739.97	0.33%	Correcto
Momento negativo (kNm)	-330.14	-156878.93	0.21%	Correcto
Axil + Mom clase 3 (K1/K2)	0.00	1.00	0.33%	Correcto
Axil + Cortante + Momento (K1/K2)	0.06	0.50	11.75%	Correcto
Pandeo (kN)	-0.13	97171.99	0.00%	Correcto

**TABLA 4.4.:** Comprobación resistente sección predimensionada para el tablero de gran rigidez.



Siendo sus atributos:

Sección ortótropa en cajón	
Atributo	Valor
Área (m <sup>2</sup> )	0.287
Área cortante (m <sup>2</sup> )	0.025
$v_{inf}$ (m)	0.682
$v_{sup}$ (m)	0.318
$I_z$ (m <sup>4</sup> )	0.331
$W_{e,z,+}$ (m <sup>3</sup> )	1.040
$W_{e,z,-}$ (m <sup>3</sup> )	0.486
$I_y$ (m <sup>4</sup> )	0.045
$W_{e,y}$ (m <sup>3</sup> )	0.023
Peso Propio (kN/m)	22.53

**TABLA 4.5.:** Atributos sección de tablero con baja rigidez.

Observamos que respecto al tablero de baja rigidez, el área ha aumentado un 17.2%, la inercia en z un 9% y el módulo de deformación en z un 10%.

#### 4.1.3 Arco con baja rigidez

El arco de baja rigidez lo consideramos como una sección metálica y hueca; de forma idéntica a las pilas verticales. Para determinar cuál debe ser el diámetro de la misma y el espesor de la chapa, consideraremos los valores de cálculo de predimensionamiento expuestos anteriormente en la determinación de las secciones del tablero.

Hemos fijado el espesor y el diámetro del arco en acero lo más esbelto posible para así reducir su rigidez. Fijamos el diámetro exterior en 0.75 metros con un espesor de chapa de 0.015 m; obteniendo así una sección con muy poca inercia (muy poco rígida) y que cumple con los criterios resistentes de su clase 3.

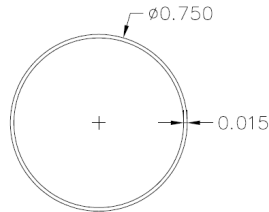
Obtenemos los siguientes resultados:

Clase sección	Clase 3
---------------	---------

	Cálculo	Resistente	Aprovechamiento de la sección	Comentario
Axil (kN)	3629.98	11178.00	32.47%	Correcto
Cortante (kN)	237.88	8552.39	2.78%	Correcto
Momento positivo (kNm)	1062.26	2013.72	52.75%	Correcto
Momento negativo (kNm)	-420.64	-5589.00	7.53%	Correcto
Axil + Cortante + Momento (K1/K2)	0.03	0.50	5.56%	Correcto
Axil + momento clase 3 (K1/K2)	0.85	1.00	85.23%	Dimensionamiento
Pandeo (kN)	3629.98	10839.64	33.49%	Correcto

**TABLA 4.6.:** Comprobación resistente sección predimensionada para el arco de poca rigidez.

El cual tendrá la siguiente forma:



**FIGURA 4.7.:** Sección del arco con baja rigidez, ortótropo. Cotas en metros.

Siendo sus atributos:

Sección arco ortótropa	
Atributo	Valor
Área (m <sup>2</sup> )	0.035
Área cortante (m <sup>2</sup> )	0.018
$v$ (m)	0.375
$I_z$ (m <sup>4</sup> )	0.002
$W_e$ (m <sup>3</sup> )	0.017
Peso Propio (kN/m)	2.748

**TABLA 4.7.:** Atributos de la sección del arco con baja rigidez, ortótropo.

#### 4.1.4 Arco con alta rigidez

El arco con alta rigidez será idéntico al de baja rigidez pero en vez de ser hueco estará relleno de hormigón, convirtiéndolo en un arco mixto, el cual es mucho más rígido.

Como en el programa de cálculo que utilizamos no nos permite introducir secciones formadas por dos o más materiales; realizaremos una equivalencia del hormigón en acero (traduciéndose a una reducción del área de hormigón).

Consideraremos la hipótesis que la construcción se realizará mediante puntales. Es decir, se realizará la colocación de todo el arco de acero soportado por éstos, en excepción de los orificios por donde se soldarán las pilas verticales. Mediante estos orificios se realizará el hormigonado por togadas; y una vez fraguado, se retirarán los puntales.

Este método constructivo nos permite considerar un peso propio que resulta ser la superposición de los pesos de ambos materiales actuando de forma simultánea, y donde se ha asemejado a una carga distribuida la acción de los puntales, al estar éstos separados una distancia máxima de  $L/10$ , la cual nos permite realizar esta hipótesis.

Consideraremos que el radio de la sección de hormigón ( $r_{real}$ ), se transformará en un espesor equivalente de acero  $e_{eq}$ , que se añadirá al existente y el cual resultará ser  $e_{eq} = r_{real}/n_{inf}$ , siendo  $n_{inf}$  el cociente de los módulos de elasticidad del acero entre el del hormigón en el momento en que se retiran los puntales.

Por tanto, el coeficiente  $n_{inf}$  resultará ser:

$$n_{inf} = \frac{E_s}{E_{ci}} \cdot (1 + \varphi)$$

Siendo  $E_s$  el módulo de elasticidad del acero (210000 MPa),  $E_{ci}$  el módulo de elasticidad a compresión del hormigón instantáneo (35000 MPa) y  $\varphi$  el coeficiente de fluencia del

hormigón, donde considerando un fraguado de 28 días, lo tomaremos aproximadamente como 2. Por lo que resulta  $n_{inf} = 18$ .

Se obtiene un espesor equivalente de 20 mm, que sumados a los 15 mm de acero se obtiene un espesor total de 35 mm.

Mediante los valores de cálculo de predimensionamiento, observamos que la sección cumple bajo criterios resistentes:

Clase sección	Clase 1
---------------	---------

	Cálculo	Resistente	Aprovechamiento de la sección	Comentario
Axil (kN)	3629.98	25372.29	14.31%	Correcto
Cortante (kN)	237.88	19955.59	1.19%	Correcto
Momento positivo (kNm)	1062.26	4334.01	24.51%	Correcto
Momento negativo (kNm)	-420.64	-4334.01	9.71%	Correcto
Axil + Cortante + Momento (K1/K2)	0.01	0.50	2.38%	Correcto
Axil + momento clase 3 (K1/K2)	1062.26	4175.04	25.44%	Correcto
Pandeo (kN)	-420.64	-4175.04	10.08%	Correcto

TABLA 4.8.: Comprobación resistente sección predimensionada para el arco de alta rigidez.

Siendo sus atributos:

Sección arco mixta	
Atributo	Valor
Área (m <sup>2</sup> )	0.079
Área cortante (m <sup>2</sup> )	0.039
$v$ (m)	0.375
$I_z$ (m <sup>4</sup> )	0.005
$W_e$ (m <sup>3</sup> )	0.014
Peso Propio (kN/m)	20.748

TABLA 4.9.: Atributos de la sección del arco con alta rigidez, mixto.

Donde el peso propio que se debe considerar es la suma lineal del de acero y hormigón, ateniéndonos a la hipótesis que anteriormente hemos realizado.

Respecto al arco de baja rigidez, se ha aumentado el área equivalente en un 44% y la inercia en un 40%; hecho que se notará mucho en el cálculo de la rigidez y consecuentemente en el cálculo dinámico.

## 4.2 PASARELA ATIRANTADA

Las pasarelas atirantadas son una solución que suele ser utilizada en zonas urbanas más modernas. Generalmente, están proyectadas pensando más en su impacto estético que no en su funcionalidad; ya que, para las luces que comúnmente necesitan cubrir, otra solución estructural sería mucho más económica.

Un claro ejemplo de ello es la pasarela atirantada "La Rosa" en A Coruña; donde puede verse en la figura 4.8.:



FIGURA 4.9.: Pasarela atirantada "La Rosa" en A Coruña

Es evidente que la solución adoptada en este caso podría haber sido mucho más económica; ya que la distancia que tiene que salvar sólo son 32 metros y la solución adoptada tiene más de 156 metros. Por tanto, queda constancia que el objetivo de esta pasarela era más el impacto visual de modernidad que no de satisfacer la necesidad de un paso superior al autopista (**González 2004**).

Vistos nuestros objetivos, resulta ser muy atractivo analizar este tipo de pasarelas tan elegantes y particulares: son sinónimo de modernidad y de futuro. Además, la respuesta dinámica será particular y diferente al resto de tipologías de pasarelas presentadas.

Hemos definido un esquema estructural que suele ser común en pasarelas atirantadas, el cual puede observarse en la siguiente figura 4.10:

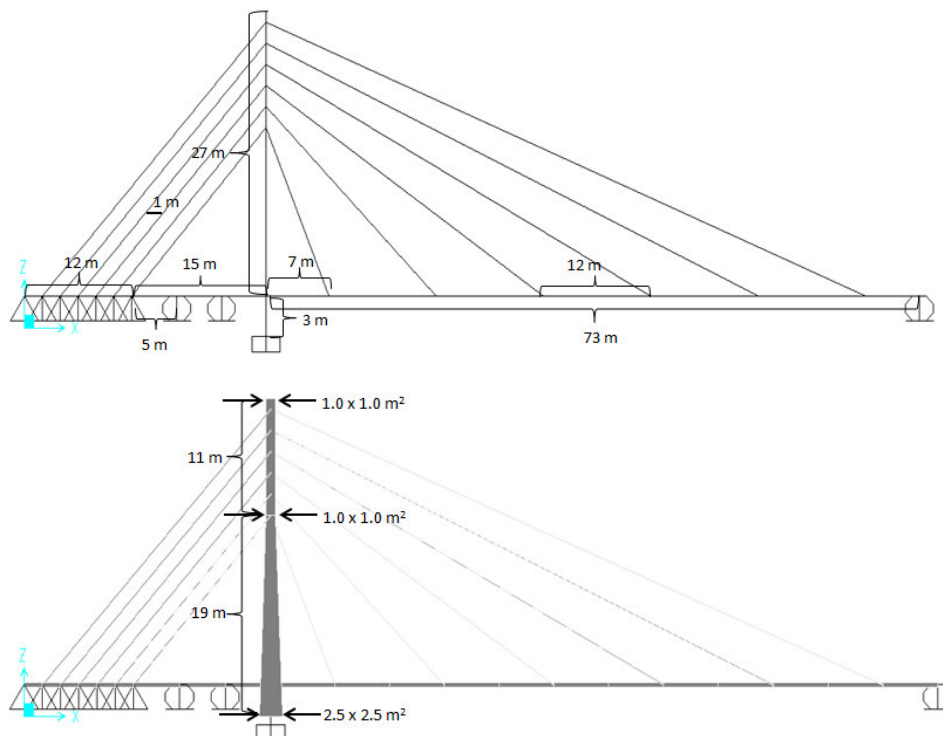


FIGURA 4.10.: Esquema estático pasarela atirantada. Cotas y características de la pila.

Se trata de una pasarela atirantada de una única pila, cuya sección es variable desde su base hasta el inicio del anclaje de los tirantes; con el objetivo de optimizar la distribución de las leyes de esfuerzos en ésta.

Esta pila será hueca en su interior, con el fin de introducir los anclajes en los cables, y será de hormigón armado.

Se ha modelizado una losa de contrapeso en su costado izquierdo, donde se anclan los cables con este fin. Además, entre esta losa y la pila, se han considerado 2 pilas para soportar este tramo. Finalmente, se considera que no hay contacto entre la pila y el tablero en el punto donde se cruzan.

Luego, hemos definido 2 secciones del tablero posibles; una ortótropa y otra mixta. La respuesta dinámica que obtendremos en ambos casos será distinta; aunque la funcionalidad y el coste serán aproximadamente similares.

A continuación, se presentarán estas dos secciones, así como sus atributos característicos. Posteriormente, realizaremos el cálculo del tesado de los tirantes, considerando únicamente el peso propio y de las cargas permanentes.

#### 4.2.1 Sección ortótropa

En primer lugar, realizaremos un predimensionamiento para conocer en qué orden de magnitud deben estar los espesores de la chapa metálica que emplearemos.

Hemos definido que será una sección cajón al tener los anclajes de los cables en el centro de la sección, ya que compensa los esfuerzos de torsión producidos por las cargas permanentes.

La altura de la sección la hemos definido tomando  $c/L_{\max} = 1/50$ ; es decir, una altura de  $c = 1.5$  m, alejada de las recomendaciones para puentes de carretera (**Manterola, 2006**) donde se define que deben estar del orden de  $c/L \cong 1/22$ .

Aunque, observando otros antecedentes en pasarelas peatonales, los espesores usados son mucho más esbeltos.

Tomando de ejemplo la pasarela "La Rosa", ésta tiene un tablero de 1 metro de canto (ortótropo) y un desarrollo de 156 metros (**González 2004**). Eso supone una relación de aproximadamente  $c/L \cong 1/150$ ; mucho más esbelto que nuestro caso.

Como hemos hecho en la pasarela en arco, para determinar el axil, cortante y momentos de diseño realizaremos un predimensionamiento.

El peso propio queda determinado en base a la área aproximada de la sección (unos  $0.5 \text{ m}^2$ ) y el peso específico del acero ( $78.5 \text{ kN/m}^3$ ); es decir, una carga de  $39 \text{ kN/m}$ . Por otro lado, las cargas permanentes tendrán un valor de  $4 \text{ kN/m}$  y las sobrecargas de uso  $20 \text{ kN/m}$  y una puntual del 10% del total de las sobrecargas verticales (ver apartado correspondiente).

Al desconocer el tesado y el área de los cables activos, los hemos considerado de rigidez infinita para realizar este predimensionamiento.

En una primera iteración, dimensionaremos las chapas para que la clase de sección sea de tipo 3. Es decir, una chapa superior de 30 mm de espesor y una inferior de 20 mm.

Por lo que hace las chapas laterales (la de las almas), consideraremos el espesor mínimo admisible (10 mm), ya que observando los cortantes máximos obtenidos, éstos distan de su límite elástico.

Los resultados que obtenemos son los siguientes:

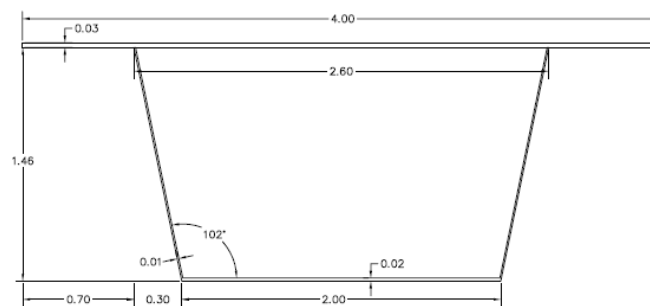
Tipo clase sección en momento positivo	Clase 3
Tipo clase sección en momento negativo	Clase 3

	Cálculo	Resistente	Aprovechamiento de la sección	Comentario
Axil (kN)	10420.81	61511.82	16.94%	Correcto
Cortante (kN)	2720.31	5701.60	47.71%	Correcto
Momento positivo (kNm)	14736.96	159041.82	9.27%	Correcto
Momento negativo (kNm)	-7340.12	-66560.05	11.03%	Correcto
Axil + Mom clase 3 (K1/K2)	0.28	1.00	27.97%	Correcto
Axil + Cortante + Momento (K1/K2)	0.48	0.50	95.42%	Dimensionamiento
Pandeo (kN)	10420.81	39991.54	26.06%	Correcto

**TABLA 4.10.:** Predimensionamiento de la sección ortótropa de la pasarela atirantada.

Observamos que cumplimos sobradamente con los criterios resistentes exigidos por la EAE, por lo que el predimensionamiento es apto.

La sección considerada es, por tanto, la siguiente mostrada en la figura 4.11:



**FIGURA 4.11.:** Sección ortótropa empleada

Los atributos de esta sección son los siguientes, los cuales serán los que introduzcamos en el programa de cálculo:

Sección ortótropa en cajón	
Atributo	Valor
Área (m <sup>2</sup> )	0.191
Área cortante (m <sup>2</sup> )	0.030
$v_{inf}$ (m)	1.057
$v_{sup}$ (m)	0.443
$I_z$ (m <sup>4</sup> )	0.218
$W_{e,z,+}$ (m <sup>3</sup> )	0.493
$W_{e,z,-}$ (m <sup>3</sup> )	0.206
$I_y$ (m <sup>4</sup> )	0.073
$W_{e,y}$ (m <sup>3</sup> )	0.037
Peso Propio (kN/m)	14.993

**TABLA 4.11.:** Atributos sección ortótropa empleada.

#### 4.2.2 Sección mixta

Aunque la sección ortótropa cumpla sobradamente los criterios resistentes, hemos considerado interesante plantear una sección mixta; puesto que su comportamiento dinámico resulta ser diferente al de la ortótropa (al ser su rigidez distinta).

Consideraremos la hipótesis que la construcción se realizará mediante puntales, como ya lo hemos hecho en el arco mixto. Es decir, en primer lugar se colocará la chapa metálica inferior en su totalidad y posteriormente se hormigonará la losa de compresión (después de la colocación de armado). Cuando el hormigón haya fraguado, se retirarán los puntales y será en este momento cuando actúe el peso propio del tablero.

Este método constructivo nos permite considerar un peso propio que resulta ser la superposición de los pesos de ambos materiales actuando de forma simultánea, y donde se ha asemejado a una carga distribuida la acción de los puntales, al estar éstos separados una distancia máxima de  $L/10$ , la cual nos permite realizar esta hipótesis.

Como el programa de cálculo no nos permite considerar una sección con dos materiales, equipararemos las propiedades del hormigón a las del acero.

Para un espesor de la losa de hormigón constante (donde se ha considerado de 0.2 m), transformaremos la base del hormigón ( $b_{real}$ ) a un ancho  $b_{eq}$ , el cual resultará ser  $b_{eq} = b_{real}/n_{inf}$ , siendo  $n_{inf}$  el cociente de los módulos de elasticidad del acero entre el del hormigón en el momento en que se retiran los puntales.

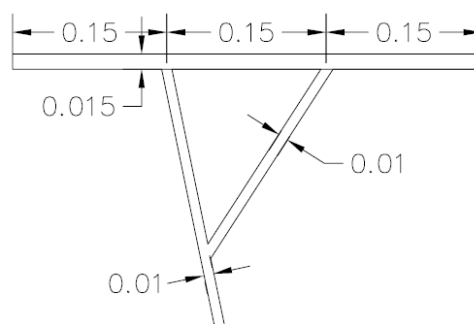
Por tanto, el coeficiente  $n_{inf}$  resultará ser:

$$n_{inf} = \frac{E_s}{E_{ci}} \cdot (1 + \varphi)$$

Siendo  $E_s$  el módulo de elasticidad del acero (210000 MPa),  $E_{ci}$  el módulo de elasticidad a compresión del hormigón instantáneo (35000 MPa) y  $\varphi$  el coeficiente de fluencia del hormigón, donde considerando un fraguado de 28 días, lo tomaremos aproximadamente como 2. Por lo que resulta  $n_{inf} = 18$ .

Consideraremos que las áreas equivalentes de hormigón están apoyadas sobre las almas de la sección cajón (cada región simétrica de 2 m de ancho real, pasarán a ser de 0.11 m). Consecuentemente, obtenemos una losa de compresión de 0.22 m de ancho por 0.2 m de espesor, cuyas propiedades de resistencia son las del acero.

Los apoyos sobre los que se sustentará el hormigón presentan las siguientes características mostradas en la figura 4.12:



**FIGURA 4.12:** Detalle apoyo izquierdo sobre el que se sustentará el hormigón . Cotas en metros

Para realizar un predimensionamiento, podemos utilizar los valores de cálculo ya obtenidos en esta misma operación para la sección ortótropa.

En esta alternativa, deberemos definir 2 secciones tipo; una para la región de momentos positivos y otra para los negativos, ya que en esta última será necesario considerar armaduras pasivas.

La transición entre ambas secciones se situará a  $0.20L$  de la distancia de los apoyos simples (pilas y estribos).

- $M^+$

Para el caso de los momentos positivos, no será necesario considerar un armado en la losa de hormigón, puesto que ésta estará únicamente sometida a compresión, mientras que el cajón metálico absorberá las tracciones.

El espesor de las almas inclinadas se ha considerado de nuevo por el espesor mínimo debido al cortante de cálculo (10 mm); mientras que la chapa inferior se ha tomado de 20 mm para que en el tramo en que esté comprimida, ésta sea de clase 3.

Del cálculo mediante criterios resistentes, observamos que cumple con los criterios expuestos en la EAE:

Tipo clase sección en momento positivo	-
--	---

	Cálculo	Resistente	Aprovechamiento de la sección	Comentario
Axil (kN)	10420.81	56477.27	18.45%	Correcto
Cortante (kN)	2720.31	5701.60	47.71%	Correcto
Momento positivo (kNm)	14736.96	111651.94	13.20%	Correcto
Axil + Mom clase 3 (K1/K2)	0.32	1.00	31.65%	Correcto
Axil + Cortante + Momento (K1/K2)	0.48	0.50	95.42%	Dimensionamiento
Pandeo (kN)	10420.81	37492.91	27.79%	Correcto

TABLA 4.12.: Predimensionamiento de la sección mixta de la pasarela atirantada en el tramo de momentos positivos.

Donde se ha considerado que la sección tiene los siguientes atributos:

Atributos sección mixta en zona de momentos positivos	
Atributo	Valor
Área (m <sup>2</sup> )	0.175
Área cortante (m <sup>2</sup> )	0.030
$v_{inf}$ (m)	1.068
$v_{sup}$ (m)	0.607
$I_z$ (m <sup>4</sup> )	0.210
$W_{e,z,+}$ (m <sup>3</sup> )	0.346
$I_y$ (m <sup>4</sup> )	0.079
$W_{e,y}$ (m <sup>3</sup> )	0.040
Peso Propio (kN/m)	26.83

TABLA 4.13.: Atributos sección mixta empleada en zona de momentos positivos.

Donde de nuevo hemos considerado que el peso propio es la suma lineal del peso del acero y la del hormigón.



- $M^-$

Para los momentos negativos, consideraremos un armado en la losa de hormigón y unos rigidizadores en la chapa metálica inferior.

En la sección crítica, se produce un momento negativo de valor  $M_{max}^- = -7340.12$  kNm. Determinamos el valor de la tracción producida por el momento, la cual deberá ser resistida por unas armaduras superiores

$$T_d = \frac{M_d^-}{Z} \leq A_s \cdot f_{yd}$$

↓

$$A_s \geq 14304.42 \text{ mm}^2$$

Siendo  $Z$  el brazo mecánico en el que actúa el momento, el cual es la distancia entre el centro de gravedad (cdg) de la chapa inferior de la artesa y el cdg teórico de las armaduras de la losa superior, el cual lo hemos tomado por 1.59 m.

Las armaduras cuya área debe ser la obtenida o superior, las colocaremos en 2 hileras en la sección de hormigón; donde generalmente se utilizan barras de 12 mm hasta 20 mm de diámetro. Para determinar qué tipo de barra emplear, lo realizamos mediante criterio económico; donde se determina que lo ideal es disponer 72 barras de 16 mm de diámetro, muy cercana a la solución óptima como puede observarse en la siguiente figura:

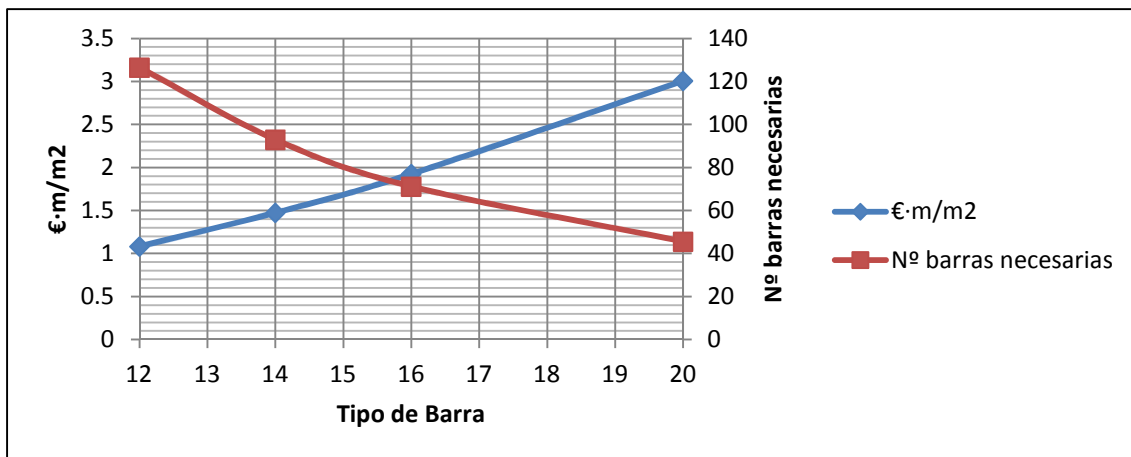


FIGURA 4.13.: Determinación de la tipología de barras óptimas a emplear.

La armadura se dispondrá a lo largo de la zona de momentos negativos, la cual la hemos definido previamente como aquella situada a  $0.2L$  de los apoyos.

Concluyendo, se considerará la sección de momentos negativos desde la distancia 0 m a la 40 m (tomando de origen el extremo izquierdo de la losa de contrapeso, ver figura 4.10.) y desde extremo derecho durante 15 m; donde se dispone de una armadura  $72\Phi 16$  (36 + 36, en 2 hileras).

Para determinar los atributos de esta sección, hemos considerado que únicamente trabaja el acero; como caso más desfavorable, el cual es que el hormigón haya fisurado en su totalidad.

Se obtienen los siguientes resultados del cálculo resistente siguiendo las indicaciones de la EAE:

<b>Tipo clase sección en momento positivo</b>	<b>Clase 3</b>
---	----------------

	Cálculo	Resistente	Aprovechamiento de la sección	Comentario
<b>Axil (kN)</b>	6326.49	32918.18	19.22%	Correcto
<b>Cortante (kN)</b>	2698.39	5701.60	47.33%	Correcto
<b>Momento negativo (kNm)</b>	-7676.24	-44008.26	17.44%	Correcto
<b>Axil + Mom clase 3 (K1/K2)</b>	0.50	1.00	49.81%	Correcto
<b>Axil + Cortante + Momento (K1/K2)</b>	0.47	0.50	94.65%	Dimensionamiento
<b>Pandeo (kN)</b>	6326.49	19440.92	32.54%	Correcto

**TABLA 4.14.:** Predimensionamiento de la sección mixta de la pasarela atirantada en el tramo de momentos negativos.

Observamos que cumplen estos criterios resistentes, donde hemos utilizado los siguientes atributos de la sección y serán los que introduciremos en el programa de cálculo:

<b>Atributos sección mixta en zona de momentos negativos</b>	
<b>Atributo</b>	<b>Valor</b>
Área (m <sup>2</sup> )	0.102
Área cortante (m <sup>2</sup> )	0.030
$v_{inf}$ (m)	0.704
$v_{sup}$ (m)	0.987
$I_z$ (m <sup>4</sup> )	0.096
$W_{e,z,+}$ (m <sup>3</sup> )	0.097
$I_y$ (m <sup>4</sup> )	0.046
$W_{e,y}$ (m <sup>3</sup> )	0.023
Peso Propio (kN/m)	26.83

**TABLA 4.15.:** Atributos sección mixta empleada en zona de momentos negativos.

#### 4.2.3 Cálculo tensado de los tirantes

El cálculo del tesado de los tirantes se basará en la anulación del peso propio del tablero y de las cargas permanentes. Aunque físicamente es imposible anular la flexión del tablero; sí que podemos optimizar su desplazamiento vertical en los puntos de anclaje de los cables.

Para el cálculo, definiremos en primer lugar unos cables cuya rigidez tiende a infinito y se encuentran sin tesar. Para introducir este estado en el programa de cálculo, se definirán las áreas de los mismos con valores muy elevados (p.ej.  $A = 10^8 \text{ m}^2$ ).

Obtendremos unos axiles óptimos que prácticamente anulan el desplazamiento vertical del tablero. Para obtener este estado en la realidad, lo traduciremos a una área mínima de los cables y a un tesado.

Para el cálculo del área mínima, debe considerarse que los axiles producidos por el peso propio no pueden sobrepasar el 35% de la tensión máxima del acero en los cables. Es decir:

$$\sigma_g \leq 0.35 \cdot f_{max}$$

$$A_i = \frac{F_i}{0.35 \cdot f_{max}}$$

Siendo  $f_{max} = 1860$  MPa y  $F_i$  el axil de los cables.

Luego, el valor del tesado debe aproximarse al axil óptimo determinado con los cables de rigidez quasi-infinita.

Como en el programa de cálculo utilizado (SAP2000) no permite la introducción de los valores del tesado, lo igualaremos a una contracción producida por un descenso brusco de la temperatura del material. Igualaremos la deformación producida por un tesado a la producida por un descenso brusco de temperatura:

$$\varepsilon_{s,i} = \frac{\Delta L_i}{L} = \frac{F_i}{E \cdot A_i}$$

$$\varepsilon_t = -\alpha \cdot \Delta T$$

Siendo  $\alpha$  el coeficiente de dilatación térmica, donde se toma como  $1,0 \cdot 10^{-5} / ^\circ\text{C}$  y  $E$  el módulo de elasticidad asociado al acero activo, el cual se le asociará un valor de  $190 \text{ kN/mm}^2$ .

Por tanto, en el programa de cálculo tendremos que introducir el siguiente valor en el incremento de temperatura:

$$\Delta T = -\frac{F_i}{E \cdot A_i \cdot \alpha}$$

Como la relación  $F_i/A_i$  la hemos establecido como el 35% de la resistencia a tracción máxima del acero  $f_{max}$ ; obtenemos que el tesado de congelación debe estar en el orden de  $\Delta T = -342.63 ^\circ\text{C}$ .

Este valor no será constante ya que calcularemos el tesado de congelación una vez tomada el área de los cordones que cumplen con el área mínima.

Es decir, se obtienen las siguientes áreas y tesados por congelación si consideramos la sección ortótropa:

Tirante	Axil (kN)	Area mínima (mm <sup>2</sup> )	Nº Cordones Necesarios	Area Tirante (mm <sup>2</sup> )	ΔT (°C)
T01	158.918184	244.1139543	2	300	-278.803832
T03	362.338993	556.588315	4	600	-317.841222
T05	413.153671	634.6446563	5	750	-289.932401
T07	413.215838	634.7401512	5	750	-289.976027
T09	1272.25679	1954.311511	19	2850	-234.95047
T11	-1540.90405	1954.311511	19	2850	-234.95047
TT01	-2007.76761	2411.75274	19	2850	-289.944789
TT02	1570.05103	2411.75274	19	2850	-289.944789
TT03	589.15537	905.0005678	7	1050	-295.315975
TT04	498.096298	765.1248812	6	900	-291.284385
TT05	357.279423	548.8163182	4	600	-313.403003
TT06	98.1161351	150.7160294	2	300	-172.13357

**TABLA 4.16.:** Áreas y variaciones de temperatura asociados a los cables en una primera iteración considerando el tablero ortótropo

No obstante, al introducir estos valores y ejecutado el programa, se producen desplazamientos en la pila y en el vano de la pasarela considerando el peso propio, las cargas permanentes y este tesado. Concretamente, observamos que este tesado es excesivo. Así pues, debemos acabar de ajustar en primer lugar el tesado, y posteriormente el área de los cables. Esto implica un proceso iterativo que finalizará cuando estos desplazamientos sean mínimos.

Cabe añadir que en los cables T01 y TT01; correspondientes a los cables más exteriores, se produce un error de cálculo en el programa SAP2000, como puede observarse en la anterior tabla. En una primera iteración, tomaremos los valores de los cables más próximos, tanto para el área como para el tesado. Se observa consecuentemente un comportamiento esperado a diferencia de esta iteración inicial.

Finalmente y tras haber realizando diversas iteraciones, obtenemos un desplazamiento máximo del tablero de unos 6 mm y de 4 mm en la pila; valores que entran sobradamente dentro de las tolerancias exigidas en la IAP-11 en su cálculo simplificado de ELS ( $\lll L/1200$ ); y donde además, nos ayudarán a compensar relativamente las sobrecargas.

Para obtener este caso, únicamente se han tenido que modificar los tesados; por lo que se obtiene:

Tirante	Nº Cordones Necesarios	Area Tirante (mm <sup>2</sup> )	$\Delta T$ iterada (°C)
T01	2	300	-188.80
T03	4	600	-217.84
T05	5	750	-169.93
T07	5	750	-169.98
T09	19	2850	-134.95
T11	19	2850	-144.95

TT01	19	2850	-199.94
TT02	19	2850	-189.94
TT03	7	1050	-175.32
TT04	6	900	-171.28
TT05	4	600	-213.40
TT06	2	300	-82.13

**TABLA 4.17.:** Cables y tesados para la pasarela atirantada con sección ortótropa. Última iteración.

Idénticamente a la sección ortótropa, realizamos el cálculo de los tirantes para la sección mixta:

Tirante	Nº Cordones Necesarios	Area Tirante (mm <sup>2</sup> )	$\Delta T$ iterada (°C)
T01	2	300	-139.52
T03	4	600	-172.97
T05	4	600	-219.93
T07	4	600	-217.40
T09	19	2850	-105.97
T11	19	2850	-105.97

TT01	19	2850	-158.71
TT02	19	2850	-158.71
TT03	6	900	-202.30
TT04	5	750	-207.15
TT05	4	600	-171.04
TT06	1	150	-176.29

**TABLA 4.18.:** Cables y tesados para la pasarela atirantada con sección mixta. Última iteración.

Para este caso, obtenemos un desplazamiento máximo en el tablero de 6 mm y en la pila de 8 mm; valor que de nuevo entran sobradamente dentro de las tolerancias exigidas.

### 4.3 PASARELA PÓRTICO

Finalmente, también hemos considerado una pasarela pórtico. Este tipo de pasarelas se asemejan en su comportamiento a los puentes en arco pre-modernos y construidos desde la antigua Grecia; donde su principal característica consiste en una sucesión de pilas separadas generalmente por una luz constante. Esta luz dependía de la altura del puente y de la capacidad resistente, mientras que el número de pilas dependía de la luz total que se deseaba cubrir.

Actualmente, suelen ser los puentes más económicos para salvar distancias medias o cortas. Son comúnmente utilizados en las infraestructuras lineales, donde generalmente no es prioritario un impacto estético.

Esto no conlleva a que no existan puentes o pasarelas pórtico majestuosas y elegantes. Las formas y geometrías que éstos pueden tener son muy variadas. Podemos ver dos ejemplos a continuación; donde su impacto estético y visual es muy diferente:



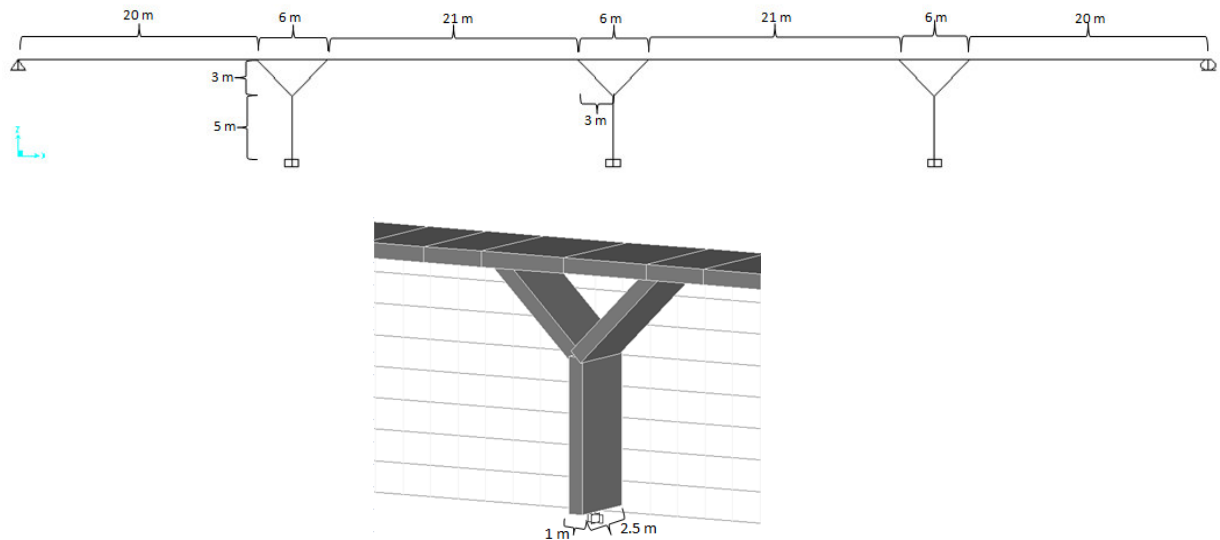
**FIGURA 4.14.:** Puente pórtico de São João en Oporto.



**FIGURA 4.15.:** Puente de carretera en Fengcheng, China.

Suelen ser comunes las pasarelas que presentan células triangulares, como el puente de carretera en Fengcheng presentado en la anterior figura.

Por tanto, hemos considerado oportuno considerar como alternativa una pasarela pórtico, cuya geometría puede observarse a continuación:



**FIGURA 4.16.:** Geometría de la pasarela pórtico considerada. Detalle pila (las 3 presentan la misma geometría).  
Cotas en metros.

Se trata de una pasarela con 3 pilas para cubrir los 100 metros, cuya arquitectura es idéntica a la del puente de carretera de Fengcheng. Estas pilas serán huecas y el espesor de hormigón se ha determinado en 0.2 m.

Como hemos realizado con las anteriores tipologías de puentes, para este caso también hemos considerado diversas alternativas para el tablero.

La observación de otras pasarelas y puentes nos ha indicado que, para una luz máxima de 21 metros, la sección transversal óptima sería preferiblemente la de un tablero de vigas, la de una losa maciza de hormigón pretensado o ésta última aligerada.

Hemos considerado estas dos últimas; tomando una losa de hormigón pretensado y observando qué respuesta tiene si está aligerada o no.

El hecho que sean tableros pretensados, nos permite asegurar que los resultados obtenidos en el programa de cálculo; donde la elasticidad e inercia son invariantes, serán los que se producirán en la realidad de una forma muy cercana. No se calculará el pretensado ya que no entra dentro de los objetivos de la tesina.

Calcularemos los valores de los esfuerzos resultantes en una sección de predimensionamiento, como hemos realizado en las anteriores alternativas.

Para determinar los dinteles en los que la sobrecarga de uso es más desfavorable, hemos realizado diversas hipótesis de carga; donde hemos determinado que es cuando hay carga en el primer dintel, en el cuarto y en el quinto.

#### 4.3.1 Tablero losa maciza de hormigón pretensado

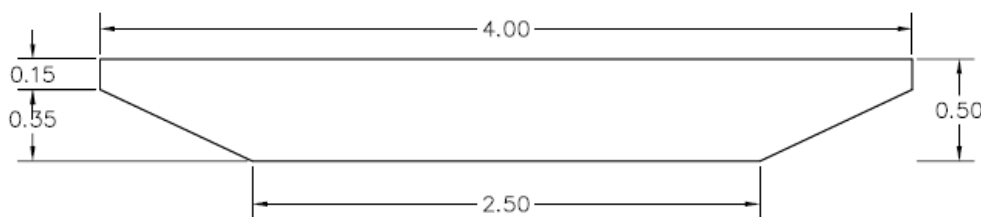
Esta primera alternativa consistirá en una losa trapezoidal pretensada de un canto esbelto (0,5 metros); cuya relación  $c/L_{max}$  será aproximadamente 1/10.

A continuación se muestra la forma de ésta sección y sus principales atributos:

Atributos sección losa maciza de Hormigón pretensado	
Atributo	Valor
Área (m <sup>2</sup> )	1.737
$v_{inf}$ (m)	0.270
$v_{sup}$ (m)	0.230
$I_z$ (m <sup>4</sup> )	1.855
$W_{e,z,+}$ (m <sup>3</sup> )	0.124
$W_{e,z,-}$ (m <sup>3</sup> )	0.146
$I_y$ (m <sup>4</sup> )	0.035
$W_{e,y}$ (m <sup>3</sup> )	0.018
Peso Propio (kN/m)	43.425

**TABLA 4.19.:** Atributos sección transversal de la losa maciza de hormigón pretensado.

Teniendo una forma:



**FIGURA 4.17.:** Sección transversal de la losa maciza de hormigón pretensado. Cotas en metros

Esto se traduce a un peso propio de aproximadamente 41.68 kN/m; donde obteniendo los esfuerzos observamos que la capacidad resistente de la sección cumple:

	Tensión Máxima (kN/m <sup>2</sup> )	Resistencia Compresión elástica (0,60·f <sub>ck</sub> ) kN/m <sup>2</sup>	Aprob
<b>Tablero Pretensado</b>			
<b>Losa Maciza</b>	1665.12	18000	9.25%

**TABLA 4.20.:** Comprobación resistente tablero losa maciza pretensada.

Obsérvese que hemos considerado como límite resistente 0.60 f<sub>ck</sub>; que es el límite aproximado al que la respuesta estructural puede considerarse elástica y por tanto nos aseguramos que el valor de la elasticidad e inercia se mantiene constante.

#### 4.3.2 Tablero aligerado de hormigón pretensado

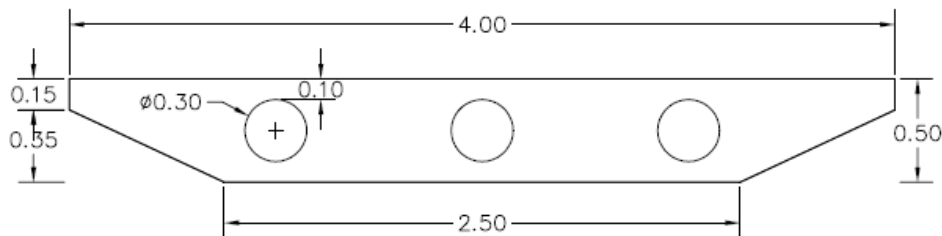
La segunda alternativa planteada será similar a la primera, pero en este caso dispondremos de aligeramientos interiores. Esto se traducirá un reducimiento del área, aunque la variación de la inercia no serán importantes.

La forma de esta sección y sus atributos se muestran a continuación:

Atributos sección losa aligerada de Hormigón pretensado	
Atributo	Valor
Área (m <sup>2</sup> )	1.525
$v_{inf}$ (m)	0.273
$v_{sup}$ (m)	0.227
$I_z$ (m <sup>4</sup> )	1.712
$W_{e,z,+}$ (m <sup>3</sup> )	0.133
$W_{e,z,-}$ (m <sup>3</sup> )	0.159
$I_y$ (m <sup>4</sup> )	0.033
$W_{e,y}$ (m <sup>3</sup> )	0.017
Peso Propio (kN/m)	38.125

**TABLA 4.21.:** Atributos sección transversal de la losa aligerada de hormigón pretensado.

Teniendo una forma:



**FIGURA 4.18.:** Sección transversal de la losa aligerada de hormigón pretensado. Cotas en metros

Esto se traduce a un peso propio de aproximadamente 36.6 kN/m; donde obteniendo los esfuerzos observamos que la capacidad resistente de la sección cumple:

	Tensión Máxima (kN/m <sup>2</sup> )	Resistencia Compresión elástica (0,60·f <sub>ck</sub> ) kN/m <sup>2</sup>	Aprob
<b>Tablero Pretensado</b>			
<b>Losa Aligerada</b>	1552.28	18000	8.62%

**TABLA 4.22.:** Comprobación resistente tablero losa aligerada pretensada.

Hemos conseguido reducir el área en un 12.2%, mientras que la inercia vertical un 7.71% y la horizontal 5.71%; valores considerablemente diferentes y que nos permitirán ver la diferencia en el cálculo dinámico.

Finalmente, observamos que el aprovechamiento de la sección es bastante reducido. Si buscamos reducir el canto de la sección, como queremos que ambos dispongan del mismo canto, los aligeramientos deberíamos de realizarlos tan pequeños para cumplir con los espesores mínimos que la diferencia entre ambas secciones apenas se apreciará. Por tanto, consideramos que es correcto este predimensionamiento.



## 5. CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES

Definidas las alternativas, pasaremos a describir las características consideradas en los materiales utilizados.

### 5.1 HORMIGÓN

#### 5.1.1 Resistencia a compresión

La resistencia a compresión depende del tipo de hormigón a utilizar. Estrictamente, deberíamos utilizar diferentes tipos de hormigón para cada uno de los elementos que conforman las pasarelas; pero para simplificar el modelo escogeremos un único tipo.

Sabiendo que la resistencia característica mínima en elementos estructurales es de 30 MPa para requisitos de durabilidad; se determina que el tipo de hormigón a utilizar es del tipo **HA-50-B-20-IIIa**.

#### 5.1.2 Módulo de elasticidad

Se considera el módulo instantáneo de deformación longitudinal secante  $E_{CM}$  a 28 días desde el hormigonado tal y como viene especificado en el apartado 39.6 de la EHE-08:

$$E_{CM} = 8500 * (f_{cm})^{1/3}$$

siendo  $f_{cm} = f_{ck} + 8 \text{ N/mm}^2$

Como el hormigón tiene una resistencia a compresión de  $f_{ck} = 30 \text{ MPa}$ ; se obtiene que  $f_{cm} = 38 \text{ MPa}$ ; obteniendo así un módulo de elasticidad de  **$E_{CM} = 28576.80 \text{ MPa}$** .

No se ha considerado necesario el cálculo del módulo  $E_c$  previo a los 28 días desde hormigonado debido a que no se detallarán en el presente documento los procedimientos constructivos.

#### 5.1.3 Coeficiente de amortiguamiento

Considerando las indicaciones de la normativa Sétra para pasarelas peatonales en la tabla 2.6 de su apartado 4.4.2 (**Sétra 2006**), se considerarán los siguientes valores de amortiguamiento:

Tipo	Coeficiente de amortiguamiento (%)
Hormigón armado	1.3%
Hormigón pretensado	1%
Mixta	0.6%

TABLA 5.1.: Coeficientes de amortiguamiento en hormigón/estructura mixta.

El programa de cálculo que utilizaremos nos permitirá introducir dichos valores en la definición de la carga dinámica, por lo que consideraremos el tipo de tablero para definir este coeficiente.

#### 5.1.4 Coeficiente de dilatación térmica

Se considera  $\alpha = 1,0 \cdot 10^{-5} / ^\circ\text{C}$  según estándares

## 5.2 ACERO

Según se observa en las alternativas planteadas, usaremos el material de acero para distintos tipos de elementos estructurales; ya sea para la sección ortótropa, mixta o para los cables de la pasarela atirantada.

### 5.2.1 Resistencia

La resistencia del acero que hemos considerado:

- Acero Pasivo B 500 S
- Acero Activo Y 1860 S7
- Acero en chapas y perfiles S355 J2

### 5.2.2 Módulo de elasticidad

Se ha estimado que el módulo de elasticidad del acero; ya sea pasivo o laminado, es del orden de **E = 200000 MPa**. Por otro lado, el acero activo de pretensado se ha considerado de **190000 MPa**.

### 5.2.3 Coeficiente de amortiguamiento

Considerando las indicaciones de la normativa Sétra para pasarelas peatonales en la tabla 2.6 de su apartado 4.4.2 (**Sétra 2006**), se considerarán los siguientes valores de amortiguamiento:

Tipo	Coeficiente de amortiguamiento (%)
Acero	0.4%
Mixta	0.6%

**TABLA 5.2.:** Coeficientes de amortiguamiento en acero/estructura mixta.

El programa de cálculo que utilizaremos nos permitirá introducir dichos valores en la definición de la carga dinámica, por lo que consideraremos el tipo de tablero para definir este coeficiente.

### 5.2.4 Coeficiente de dilatación térmica

Se considera  $\alpha = 1,2 \cdot 10^{-5} / ^\circ\text{C}$  según estándares.

## 6. DIMENSIONAMIENTO

Definidas todas las alternativas, realizado el predimensionamiento y descritos los materiales empleados, realizaremos el dimensionamiento de cada una de las alternativas considerando los límites tolerables de ELS y ELU definidos en la EHE (**EHE 2008**), EAE (**EAE 2011**) y IAP-11 (**IAP 2011**).

### 6.1 ACCIONES CONSIDERADAS

Las acciones consideradas serán diferentes según la alternativa. Seguidamente se presentarán todas las acciones que pueden darse; detallándose en cada una para qué caso se da.

#### 6.1.1 Acciones permanentes de valor constante

Son aquellas acciones que estarán presentes durante toda la vida de la estructura.

- **Peso propio**

Carga que depende de la geometría de la sección. Para nuestro caso, donde se utiliza el hormigón y acero, se han considerado los siguientes pesos específicos:

- Hormigón                      25,0 kN/m<sup>3</sup>
- Acero                            78,5 kN/m<sup>3</sup>

Como realizamos un cálculo bi-dimensional, quedará considerada como una carga vertical distribuida para cada uno de los elementos; en base a su sección (m<sup>3</sup>/m). El valor de esta carga queda determinada por el programa de cálculo (SAP2000).

- **Carga permanente**

Se considera una carga de 1 kN/m<sup>2</sup> donde se incluye al pequeño espesor de pavimento peatonal y las barandillas metálicas; comunes para cualquier tipo de sección transversal. Como todas ellas tienen una anchura de 4 metros; el valor de la carga permanente es de **4 kN/m** aplicada sobre todo el tablero.

#### 6.1.2 Acciones permanentes de valor no constante

Son aquellas acciones que son permanentes pero su valor varía a lo largo del tiempo; debido principalmente a las pérdidas de resistencias iniciales.

Es el caso de los efectos reológicos y la fluencia del hormigón; cargas que no serán consideradas ya que sus efectos se producen a largo tiempo y el cálculo de las mismas no entra dentro de los objetivos de la presente tesina.

El tesado de los cables para el caso del puente atirantado también es un ejemplo de acción no constante en el tiempo; ya que como sucede de forma similar en la losa de compresión del tablero, se produce una pérdida de tensión por fatiga. Dicho tipo de carga se define del tipo P2 según la IAP-11.

En el apartado "Cálculo de los tirantes para el caso del puente atirantado", se define el procedimiento de obtención de la carga de tesado de estos cables, así como su dimensión.

### 6.1.3 Sobrecarga de uso criterios de servicio

Para la comprobación del estado límite de servicio, consideraremos la carga peatonal como una carga dinámica que produce unos desplazamientos verticales en el tiempo; donde la aceleración de estos desplazamientos produce una disminución del confort de los propios peatones.

Para determinar cuál es la posición de la carga dinámica más desfavorable, seguimos las indicaciones de la norma S  tra (**S  tra 2006**); donde se define que el caso de máxima aceleración se produce para aquél momento en el que el paso de los peatones se acopla con el modo de vibración que mayor desplazamiento vertical produzca.

Es decir, consideraremos una carga peatonal descendente cuando la flecha sea ascendente y una carga peatonal ascendente cuando la flecha sea descendente:

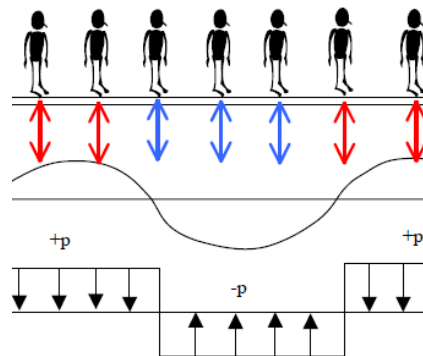


FIGURA 6.1.: Distribución de cargas más desfavorables en servicio.

El tipo de carga que utilizaremos para definir el paso de los peatones, es la siguiente definida en el Eurocódigo 1 (**National Annex 2003**), en N/s:

$$Q_{pv} = 280 \cdot \sin(2\pi f_v \cdot t)$$

Donde se ha tenido en cuenta un peso unitario del peatón de unos 700 N y donde consideraremos  $f_v = 2 \text{ Hz}$ , que es la frecuencia media de desplazamiento de un peatón cuando su paso no est   obstaculizado.

Para cada alternativa se observar   cual es su modo de vibración que produzca mayor desplazamiento vertical y se colocará la carga positiva y negativa según lo descrito en la normativa S  tra.

### 6.1.4 Sobrecarga de uso criterios resistentes

En el apartado 4.1.8 de la IAP-11 quedan definidas las sobrecargas de uso en pasarelas; como es nuestro caso, y donde tomaremos únicamente las acciones producidas por peatones:

- Carga vertical uniformemente distribuida de  $5 \text{ kN/m}^2$ ; donde se aplica en una sección de 4 m y por tanto es equivalente a una carga longitudinal  $q_{fk} = 20 \text{ kN/m}$ .
- Una fuerza horizontal longitudinal  $Q_{fIk}$  equivalente al **10%** del total de la carga  $q_{fk}$  vertical. La dirección de ésta coincidirá con la rasante del tablero.

La colocación de la carga vertical uniformemente distribuida dependerá de la situación más desfavorable.

### 6.1.5 Acción del viento

El viento se asemejará a una carga estática equivalente aplicada sobre la estructura, siguiendo el apartado 4.2. de la IAP-11.

Como para estos cálculos es necesario definir la situación y el contexto en el cual estarán situadas nuestras pasarelas; los aproximaremos a un Tipo III, que son para aquellas zonas suburbanas (para darle significado y funcionalidad como pasarela peatonal) además de estar situado en la provincia de Barcelona.

En el cálculo, aplicaremos diversas hipótesis dependiendo de la dirección predominante del viento. La primera hipótesis; consistirá en considerar la dirección transversal (Y, según nuestro sistema de coordenadas implantado en el programa de cálculo) y la dirección vertical (Z). Una segunda hipótesis, consistirá en considerar la dirección longitudinal (X). Según estas direcciones, se considerarán todos los elementos de la pasarela (pilas y tablero).

Estas hipótesis están dictadas en la IAP-11 en su apartado 4.2.4.

Inicialmente se define la velocidad básica de viento; donde hemos considerado un periodo de retorno de  $T = 100$  años y según la ubicación aproximada de las pasarelas, la velocidad básica de viento adopta el siguiente valor:

$$v_b(T = 100 \text{ años}) = c_{dir} \cdot c_{season} \cdot v_{b,0} \cdot c_{prob,T=100} = 1.0 \cdot 1.0 \cdot 29 \cdot 1.04 = 30.2 \text{ m/s}$$

La velocidad media del viento la determinaremos para las 3 alturas de las 3 pasarelas que tenemos, donde como hemos definido se consideran las 3 de Tipo III.

Se determina mediante la siguiente expresión:

$$v_m(z) = c_r(z) \cdot c_o \cdot v_b(T)$$

Estos parámetros se determinan mediante las indicaciones del apartado 4.2.2 de la IAP-11. Obtenemos los siguientes resultados para cada caso:

	$z(m)$	$c_r(z)$	$c_o$	$v_b(T) \text{ (m/s)}$	$v_m(z) \text{ (m/s)}$
<b>Arco</b>	20	0.907	1	30.2	<b>27.40</b>
<b>Atirantado</b>	3	0.497	1	30.2	<b>15.02</b>
<b>Pórtico</b>	8	0.709	1	30.2	<b>21.42</b>

**TABLA 6.1.:** Velocidad media del viento para cada una de las pasarelas

Procedemos a calcular el empuje del viento sobre el tablero y las pilas de cada una de las alternativas definidas.

#### 6.1.5.1 Empuje sobre el tablero

Consideramos que todas nuestras secciones quedan definidas como "alma llena" (donde está incluida la sección cajón).

El empuje del viento está dividido en una componente horizontal, vertical y longitudinal.

- Empuje viento componente horizontal

El primer caso, se determina mediante la siguiente expresión de la IAP-11:

$$F_{w,H} = \left[ \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_b^2(T) \right] \cdot c_e(z) \cdot c_{f,x} \cdot h_{eq}$$

Como queremos aplicar esta carga longitudinalmente y no de forma puntual; modificaremos la expresión y tomaremos  $h_{eq}$  (espesor equivalente del tablero) en vez de  $A_{ref,x}$  como aparece en la norma ( $h_{eq}$  multiplicado por la longitud total del puente; cuyo valor es 100 metros en cualquier caso).

Además, como el centro del viento aplicado no coincide con el cdg (considerando que  $cdg = cdc$ ) debemos considerar un momento aplicado, cuyo valor será pequeño debido a la esbeltez del canto.

El coeficiente de fuerza en esta dirección  $c_{f,x}$  se determina mediante la siguiente expresión:

$$c_{f,x} = 2,5 - 0,3 \cdot \left( \frac{B}{h_{eq}} \right)$$

El coeficiente de exposición  $c_e(z)$  se determina en cada caso en base a la siguiente expresión (simplificada de la mostrada en la IAP-11, aplicando los coeficientes considerando un entorno tipo III):

$$c_e(z) = 0.047 \cdot \left( \ln^2 \left( \frac{z}{0.3} \right) + 7 \cdot \ln \left( \frac{z}{0.3} \right) \right)$$

El valor de la densidad del aire  $\rho$  es  $0.0125 \text{ kN/m}^3$ .

Se obtienen entonces los siguientes valores para cada alternativa:

	$\rho \text{ (kN/m}^3\text{)}$	$v_b(T) \text{ (m/s)}$	$c_e(z)$	$c_{f,x}$	$h_{eq} \text{ (m)}$	$F_{w,H} \text{ (kN/m)}$	$M_{w,H} \text{ (kNm/m)}$
<b>Tablero poco rígido pasarela arco</b>	0.0125	30.2	2.19	1.30	1.00	<b>16.26</b>	<b>3.04</b>
<b>Tablero rígido pasarela arco</b>	0.0125	30.2	2.19	1.30	1.00	<b>16.26</b>	<b>2.96</b>
<b>Atirantado sección ortótropa</b>	0.0125	30.2	1.00	1.70	1.50	<b>14.53</b>	<b>4.46</b>
<b>Atirantado sección mixta</b>	0.0125	30.2	1.00	1.76	1.62	<b>16.24</b>	<b>3.30</b>
<b>Pórtico sección losa</b>	0.0125	30.2	1.58	1.30	1.00	<b>11.67</b>	<b>3.15</b>
<b>Pórtico sección pretensado aligerado</b>	0.0125	30.2	1.58	1.30	1.00	<b>11.67</b>	<b>3.19</b>

**TABLA 6.2.:** Valor del empuje del viento horizontal en cada una de las alternativas posibles.

- Empuje viento componente vertical

El empuje del viento vertical  $F_{w,z}$ , se calculará mediante la misma expresión; pero en este caso el coeficiente de fuerza en esta dirección siempre será  $\pm 0.9$  y en vez de considerar  $A_{ref,z}$  se considera el ancho del tablero, que en cualquier caso será de 4 metros.

Se obtienen entonces los siguientes valores para cada alternativa:

	$\rho$ (kN/m <sup>3</sup> )	$v_b(T)$ (m/s)	$c_e(z)$	$C_f$	$h_{ref}$ (m)	$F_{w,z}$ (kN/m)
<b>Arco</b>	0.0125	30.2	2.19	0.9	4	<b>45.03</b>
<b>Atirantado</b>	0.0125	30.2	1.00	0.9	4	<b>20.51</b>
<b>Pórtico</b>	0.0125	30.2	1.58	0.9	4	<b>32.33</b>

TABLA 6.3.: Valor del empuje del viento vertical en cada una de las alternativas posibles.

- Empuje viento componente longitudinal

Finalmente, el empuje del viento longitudinal se considerará únicamente para el tablero; cuyo valor será el 25% del empuje transversal, multiplicado por un coeficiente reductor  $R$  donde se consideran diferentes parámetros dependiendo de la altura sobre tierra de cada tablero.

Se obtienen entonces los siguientes valores para cada alternativa:

	$F_{w,H}$ (kN/m)	$z$ (m)	$L(z)$ (m)	$\phi(L/L(z))$	$R$	$F_{w,L}$ (kN/m)
<b>Arco (ambos tableros)</b>	16.26	20.00	73.64	0.29	0.82	<b>3.34</b>
<b>Atirantado sección ortótropa</b>	14.53	3.00	23.15	0.50	0.63	<b>2.28</b>
<b>Atirantado sección mixta</b>	16.24	3.00	23.15	0.50	0.63	<b>2.54</b>
<b>Pórtico (ambos tableros)</b>	11.67	8.00	42.11	0.39	0.74	<b>2.15</b>

TABLA 6.4.: Valor del empuje del viento longitudinal en cada una de las alternativas posibles.

#### 6.1.5.2 Empuje sobre las pilas

El empuje aplicado sobre las pilas tendrá un cálculo específico para cada caso; es decir, 3 alternativas.

El cálculo del empuje del viento se realizará mediante la misma expresión que el caso del tablero, pero no será una carga constante en toda la altura. En este caso, será variable en todo su desarrollo; es decir, debido al coeficiente  $c_e(z)$ , donde aproximadamente la carga tendrá una forma logarítmica.

Realizaremos una interpolación de ésta a una carga lineal para facilitar la introducción de la misma en el programa de cálculo.

- Pasarela en arco

Deberemos calcular la carga aplicada en las pilas y en el arco. En ambos casos, la forma de la sección es circular por lo que el valor del coeficiente de forma  $C_f$  será de 0.7 o 1.2 dependiendo si  $v_b(T) \cdot \sqrt{c_e(z)}$  es superior a 6 m<sup>2</sup>/s o inferior respectivamente. Obtenemos:

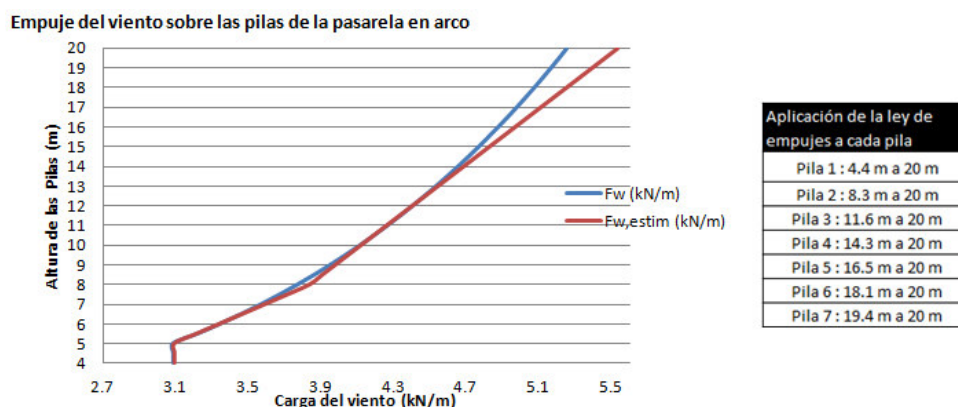
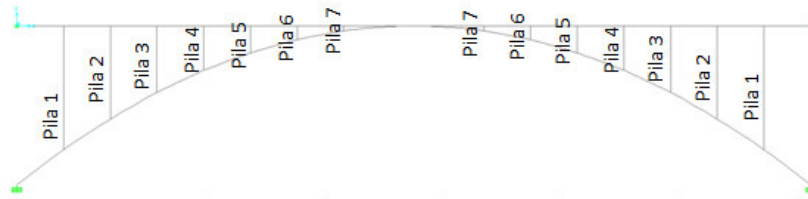


FIGURA 6.2.: Ley de empujes aplicados a las pilas; indicando el valor estimado considerado y el campo de aplicación.



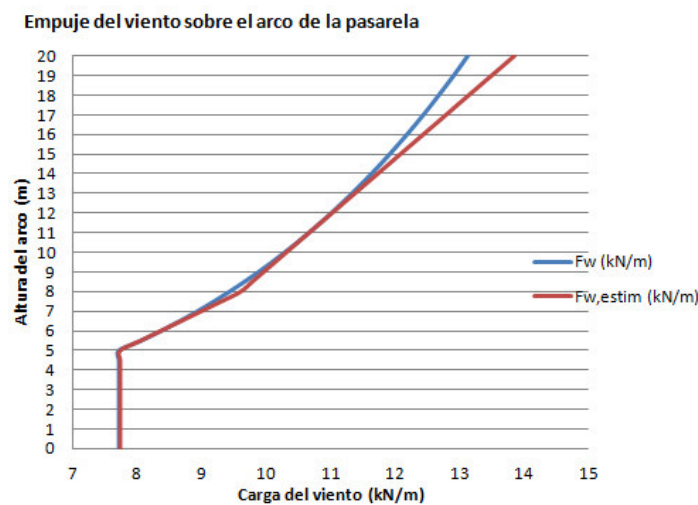
El sistema de numeración empleado en las pilas es el mostrado en la figura 6.3.:



**FIGURA 6.3.:** Numeración de las pilas de la pasarela en arco para la asignación de empujes de viento.

La ley de empujes en el arco será proporcional a la de las pilas. Resultará ser el empuje de las pilas multiplicado por una constante  $h_{eq,arco}/h_{eq,pilas}$ ; siendo  $h_{eq,arco}$  el diámetro del arco y  $h_{eq,pilas}$  el diámetro de las pilas.

Se obtiene la siguiente:



**FIGURA 6.4.:** Ley de empuje aplicado sobre el arco.

En el modelo aplicaremos el valor de los empujes denotados como  $F_{w,estim}$ ; ya que se trata de una ley trapezoidal de sencilla introducción en el programa de cálculo.

Como se observa, siempre es superior este empuje estimado al teórico. Nótese además que el valor del empuje entre la cota 0 y 5 metros es constante debido a que se ha considerado  $z_{min} = 5$  m, por las indicaciones de la IAP-11.

- **Pasarela atirantada**

Para este caso sólo tenemos que considerar un único caso, que es una pila de un total de 30 metros de altura; con 27 metros por encima del tablero. Como se ha presentado anteriormente, dispone de una sección cuadrada variable desde la base hasta la cota 19 m (de 2,5 m a 1,0 m de canto) y desde esta cota a la cota 30 una sección constante (de 1,0 m de canto).

Por tanto, el coeficiente de fuerza  $c_f$  tendrá un valor de base de 2,0 al ser sección cuadrada. Consideraremos que esta sección está redondeada por sus cuatro costados por acuerdos de radio 0.5 m; para mejorar su capacidad aerodinámica y así reducir esfuerzos. Por tanto, y según el apartado 4.2.6 de la IAP-11; aplicaremos un coeficiente reductor al  $c_f$  cuyo valor es  $1 - 2.5 \cdot r/h_{eq}$  siendo  $r$  el radio considerado (0.5 m) y  $h_{eq}$  el costado de la sección, el cual variará dependiendo de la altura.

En la norma se exige que este factor nunca sea inferior a 0.5; y como en el caso más desfavorable, donde  $h_{eq} = 2.5 \text{ m}$ , este factor ya es igual a este valor; se aplicará para uniformemente un factor  $c_f = 2 \cdot 0.5 = 1$ .

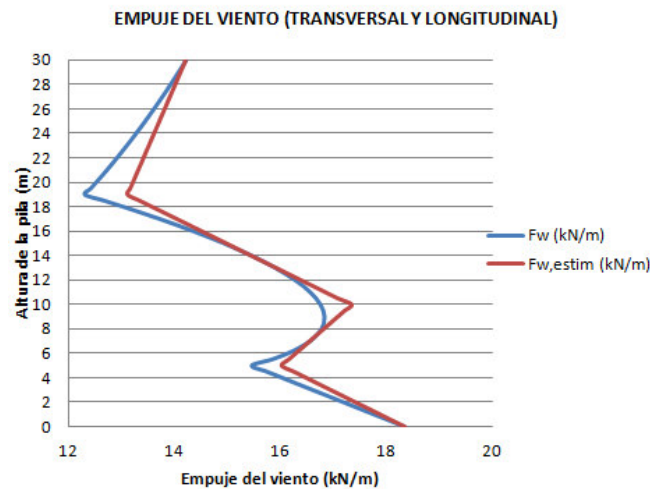


FIGURA 6.5.: Ley de empuje aplicada a la pila de la pasarela atirantada; válida para empuje longitudinal y transversal.

De nuevo en el modelo de cálculo implantaremos la ley de empujes estimada  $F_{w,estim}$  al tratarse de una ley trapezoidal.

Como el caso del puente en arco, se ha considerado siempre una cota mínima de 5 metros.

- **Pasarela pórtico**

Este último caso es el más sencillo que nos concierne, ya que el esquema estructural se componen por 3 pilas idénticas.

Existe un tramo triangular entre las cotas 5 m y 8 m; donde el canto de la pila proyectado sobre la horizontal es de 1.414 m para cada uno de los 2 lados que forma la pila triangular; mientras que entre 0 m y 5 m se considerará un canto de 1 m.

Al ser un canto tan esbelto, no consideraremos aristas redondeadas.

En la siguiente figura 6.6 se muestra la ley de empujes que tendrá cada pila transversalmente:

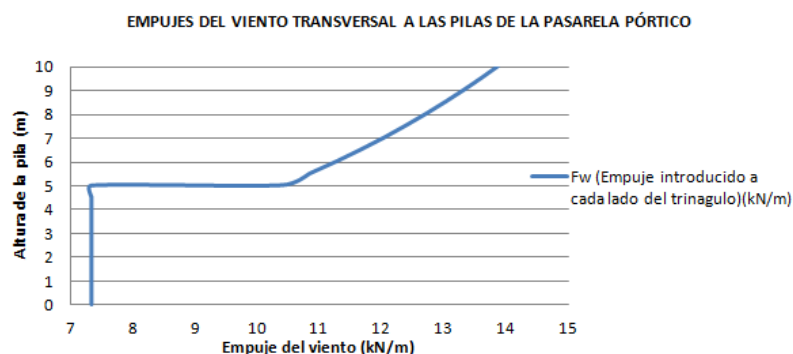


FIGURA 6.6.: Ley de empuje aplicada transversalmente al eje del tablero a cada una de las pilas de la pasarela pórtico.

Se trata de un valor constante entre 0 y 5 metros y lineal de 5 a 8 metros; por lo que será de fácil introducción al modelo de cálculo.

Por lo que hace al empuje del viento sobre las pilas en dirección longitudinal al tablero, el cálculo será idéntico pero en este caso debemos aplicar el coeficiente de ocultamiento, el cual está definido en el apartado 4.2.3 de la IAP-11. Para nuestro caso, con una pila sin orificios, con una distancia entre pilas de 20 o 21 m y una altura de 8 m, obtenemos un coeficiente medio de 0.255; el cual irá multiplicado al coeficiente de fuerza.

Obtenemos consecuentemente la siguiente ley de empujes, la cual tiene unos valores absolutos considerablemente superiores al viento transversal:

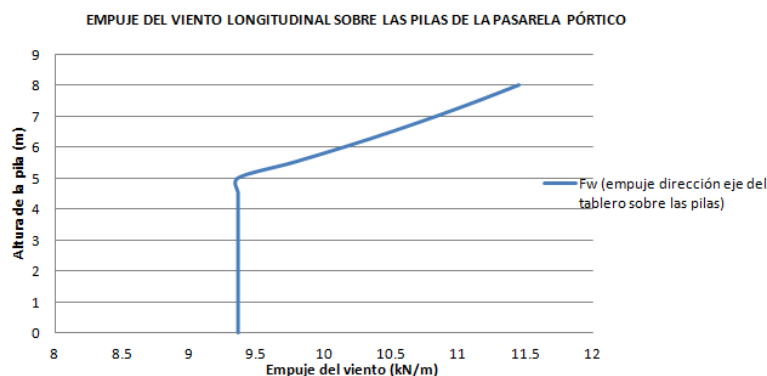


FIGURA 6.7.: Ley de empuje aplicada longitudinalmente al eje del tablero a cada una de las pilas de la pasarela pòrtico.

### 6.1.6 Acción térmica

Se debe tener presente la acción térmica sobre la estructura; la cual se determina mediante lo expuesto en el apartado 4.3.1 de la IAP-11; además es determinante la localización del puente en cuestión, donde hemos considerado en la provincia de Barcelona.

Una de las principales acciones a tener en cuenta es la componente uniforme de la temperatura máxima y mínima del tablero. Para ello debe calcularse previamente el valor característico de la temperatura máxima y mínima a la sombra en la ubicación de la obra, considerando además un periodo de retorno de  $T=100$  años (situación persistente).

Se obtiene que:

$$T_{max,p=\frac{1}{100}} = T_{max} \cdot (k_1 - k_2 \cdot \ln(-\ln(1 - 1/100))) = 40 \cdot (0.781 - 0.056 \cdot (-\ln(1 - 1/100))) = 41.5^\circ C$$

$$T_{min,p=\frac{1}{100}} = T_{min} \cdot (k_3 - k_4 \cdot \ln(-\ln(1 - 1/100))) = 40 \cdot (0.393 - 0.156 \cdot (-\ln(1 - 1/100))) = -12.2^\circ C$$

La componente uniforme de la temperatura en el tablero se calcula incrementando los valores característicos del lugar según la tabla 4.3-b de la IAP-11, mediante las expresiones:

$$T_{e,max} = T_{max,T=100} + \Delta T_{e,max}$$

$$T_{e,min} = T_{min,T=100} + \Delta T_{e,min}$$

	$T_{e,max}$	$T_{e,min}$
<b>Tipo 1: Tablero de acero</b>	57.5 °C	-15.2 °C
<b>Tipo 2: Tablero mixto</b>	45.5 °C	-8.2 °C
<b>Tipo 3: Tablero de hormigón</b>	43.5 °C	-4.2 °C

TABLA 6.5.: Componentes uniformes de temperatura en función de la tipología de tablero

Finalmente, el rango de temperaturas a considerar en el cálculo sobre todo el tablero es la diferencia entre los valores anteriores y la temperatura media durante el periodo de construcción, adaptando un valor de  $T_0 = 15^\circ\text{C}$ :

	$\Delta T_{N, \text{contracción}}$	$\Delta T_{N, \text{expansión}}$
<b>Tipo 1: Tablero de acero</b>	-30.2 °C	42.5 °C
<b>Tipo 2: Tablero mixto</b>	-23.2 °C	30.5 °C
<b>Tipo 3: Tablero de hormigón</b>	-19.2 °C	28.5 °C

**TABLA 6.6.:** Rangos de la componente uniforme de la temperatura

Para el resto de elementos estructurales que conforman la pasarela, también consideraremos estas temperaturas mostradas en la anterior tabla, siempre dependiendo del material por la que estén formadas.

Por otro lado, no consideraremos gradientes de temperatura entre cara superior e inferior (ni en el tablero ni en las pilas, estribos), ya que no influye excesivamente en el cálculo de los estados límite y no es relevante para los objetivos de la presente tesina.

### 6.1.7 Nieve

La IAP-11 determina que solo es necesario considerar la sobrecarga de nieve en puentes situados en zonas de alta montaña o durante construcción. Por lo que no se considera en nuestro caso.

### 6.1.8 Sismo

Al no tener definida la situación concreta de las alternativas expuestas y según la IAP-11, podremos considerarlas de importancia normal, ya que en ningún caso corta o influye en un servicio imprescindible para la comunidad agravando los efectos catastróficos del suceso (hipótesis).

Del anejo 1 de la NCSP-07 (**NCSP 2007**) se puede extraer que, para la ciudad de Barcelona o alrededores, como hemos supuesto que será su situación, la aceleración básica de cálculo es  $a_b = 0,04 \text{ g}$  y el coeficiente de contribución  $K = 1,0$ . Para este caso, se puede calcular la aceleración sísmica de cálculo como:

$$a_c = S \times \rho \times a_b = C / 1,25 \times 1,0 \times 0,04\text{g}$$

Tal y como se expresa en el apartado 2.8 de la NCSP-07, la acción sísmica no será necesario considerarla si  $a_c < 0,04\text{g}$ . Así pues, si el coeficiente del terreno  $C < 1,25$ , podrá omitirse la acción sísmica. Para la presente tesina se adoptará esta última hipótesis como cierta.

### 6.1.9 Accidentales

No se han considerado cargas accidentales, tales como pérdidas de un tirante o situaciones catastróficas, ya que no influyen en el objetivo principal de esta tesina.

## 6.2 COMBINACIÓN DE ACCIONES

Definidas todas las acciones que hemos considerado, describiremos qué situaciones consideraremos para el cálculo elástico. Para la presente tesina, hemos considerado un Estado Límite Último y el Estado Límite de Vibraciones en pasarelas peatonales.

En ambos casos, hemos seguido las indicaciones mostradas en el artículo 6.3 y 7.2 de la norma IAP-11.

### 6.2.1 Estado Límite Último (ELU)

Se ha considerado una situación persistente o transitoria; es decir:

$$\sum \gamma_{G,j} \cdot G_{k,j} + \gamma_{Q,1} \cdot Q_{k,1} + \sum \gamma_{Q,i} \cdot \Psi_{0,i} \cdot Q_{k,i}$$

Siendo  $G_{k,j}$  las acciones permanentes (peso propio, cargas permanentes, tesados...);  $Q_{k,1}$  la acción variable dominante, y  $Q_{k,i}$  las acciones no dominantes; siendo éstas las sobrecargas de uso, el viento y la temperatura.

Se tomarán los valores de mayoración  $\gamma$  y coeficientes de simultaneidad  $\Psi$  según lo indicado en la IAP-11.

Los diferentes casos que se plantean son los siguientes:

- Plantear cual de las acciones es la dominante (3 casos).
- Caso donde la dirección del viento es perpendicular al eje del tablero (Horizontal y Vertical) y donde su dirección coincide con el eje del tablero (Longitudinal) (2 casos).
- Caso que se da una temperatura máxima y otra mínima (2 casos).

En total, obtenemos 12 casos posibles de combinación en el ELU, ya que en cualquier caso  $\gamma_{Q,i} \cdot \Psi_{0,i} > 0$ .

Una vez determinado el ELU para cada una de las alternativas, se comprobará si la sección predimensionada cumple con las exigencias de los esfuerzos, y si no es así las volveremos a dimensionar hasta asegurar su cumplimiento; siguiendo las indicaciones de la EHE-08 o EAE según el caso.

### 6.2.2 Estado Límite de Vibraciones en pasarelas peatonales

Definido en el apartado de 7.2.2 de la IAP-11, realizaremos la comprobación de que la aceleración resultante de la pasarela bajo la sobrecarga de uso en criterios de servicio se encuentra en un rango de confort aceptable.

Estos rangos de confort, definidos en el mismo apartado de la IAP-11, son los siguientes:

Grado de confort	Rangos de aceleraciones
Máximo	< 0.50 m/s <sup>2</sup>
Medio	0,50 a 1,00 m/s <sup>2</sup>
Mínimo	1,00 a 2,50 m/s <sup>2</sup>
No aceptable	> 2.50 m/s <sup>2</sup>

**TABLA 6.7.:** Rangos de aceleraciones máximas permitidas para garantizar el confort peatonal.

Debido a que posteriormente modelizaremos el paso de un único peatón, es posible que los resultados nos den una escala demasiado pequeña para obtener unas conclusiones. Por tanto, nuestro criterio de dimensionamiento tendrá la frontera tolerable en los  $2,50 \text{ m/s}^2$ .

Únicamente consideraremos la respuesta dinámica de la carga peatonal, no incluyendo la del viento puesto que la hipótesis que hemos realizado producirá únicamente una flecha no acelerada; ni tampoco la temperatura, la cual también produce por su naturaleza de acción una flecha no acelerada.

### 6.3 RESULTADOS OBTENIDOS DEL DIMENSIONAMIENTO

A continuación se describen los resultados obtenidos para cada una de las alternativas, donde se observa si la sección predimensionada cumple con la hipótesis más desfavorable considerando las cargas anteriormente descritas.

Si encontramos que no se cumplen, realizaremos un dimensionamiento.

Las tablas y la información del cálculo se encuentran en el anejo 1: tablas dimensionamiento.

#### 6.3.1 Pasarela en arco

Para este tipo de pasarela, hemos definido 3 posibles alternativas, combinando arco y tablero en función de su rigidez; para así observar cómo es su comportamiento en cada caso.

##### 6.3.1.1 Arco rígido y tablero poco rígido

La primera alternativa planteada consiste en combinar un arco rígido (mixto) con el tablero poco rígido. A continuación se describirán las comprobaciones realizadas en el estado límite de vibraciones y en el ELU.

- ELV

Las aceleraciones máximas que obtenemos con las secciones predimensionadas se hallan ampliamente en el rango de máximo confort, siendo la máxima de  $0.256 \text{ m/s}^2$ .

Como el objetivo de nuestra tesina nos requiere trabajar con aceleraciones elevadas para poder obtener resultados, hemos considerado una sección del tablero mucho menos rígido, obteniendo de este modo una aceleración máxima de  $0.359 \text{ m/s}^2$ .

Dimensionamos consecuentemente el siguiente tablero para este caso:

Sección ortótropa en cajón	
Atributo	Valor
Área ( $\text{m}^2$ )	0.090
Área cortante ( $\text{m}^2$ )	0.025
$v_{inf}$ (m)	0.583
$v_{sup}$ (m)	0.408
$I_z$ ( $\text{m}^4$ )	0.135
$W_{e,z,+}$ ( $\text{m}^3$ )	0.331
$W_{e,z,-}$ ( $\text{m}^3$ )	0.232
$I_y$ ( $\text{m}^4$ )	0.125
$W_{e,y}$ ( $\text{m}^3$ )	0.063
Peso Propio (kN/m)	7.065

TABLA 6.8.: Atributos sección re-dimensionada del tablero poco rígido

- ELU

Determinaremos los esfuerzos máximos obtenidos en el ELU y posteriormente comprobaremos si las secciones consideradas los resisten, tal y como hemos realizado en el predimensionamiento.

Por otro lado, se observa que no cumplen las pilas verticales predimensionadas, por lo que aumentamos el diámetro exterior de las mismas hasta los 0.4 m; donde los atributos de esta nueva sección:

Sección pila ortótropa	
Atributo	Valor
Área (m <sup>2</sup> )	0.029
Área cortante (m <sup>2</sup> )	0.015
$v$ (m)	0.200
$I_z$ (m <sup>4</sup> )	0.001
$W_e$ (m <sup>3</sup> )	0.003
Peso Propio (kN/m)	2.312

**TABLA 6.9.:** Atributos sección re-dimensionada de las pilas verticales de la pasarela en arco

### 6.3.1.2 Arco poco rígido y tablero rígido

Homólogamente realizaremos los cálculos para este caso.

- ELV

Observamos que para las secciones predimensionadas obtenemos una aceleración máxima de 0.238 m/s<sup>2</sup>. Del mismo modo que hemos realizado con la anterior alternativa, buscaremos reducir la rigidez de la sección con el fin de aumentar la escala.

Para este caso, reduciremos la del arco para acentuar la diferencia de rigideces, aunque debido a la poca rigidez que ya tiene, resulta difícil aumentar significativamente el rango de aceleraciones.

Finalmente, con un arco de 0.5 m de diámetro espesor, obtenemos una aceleración máxima de 0.323 m/s<sup>2</sup>.

Aunque, posteriormente como se observará en el ELU, ésta no cumple con los criterios de resistencia.

- ELU

Observamos que tanto las pilas verticales como el arco poco rígido no cumplen con los requisitos de resistencia, finalmente los re-dimensionamos y obtenemos los siguientes:

Sección arco ortótropo	
Atributo	Valor
Área (m <sup>2</sup> )	0.028
Área cortante (m <sup>2</sup> )	0.014
$v$ (m)	0.300
$I_z$ (m <sup>4</sup> )	0.001
$W_e$ (m <sup>3</sup> )	0.004
Peso Propio (kN/m)	2.164

**TABLA 6.10.:** Atributos sección re-dimensionada del arco de la pasarela en arco



Sección pilas verticales ortótropas	
Atributo	Valor
Área (m <sup>2</sup> )	0.029
Área cortante (m <sup>2</sup> )	0.015
$v$ (m)	0.200
$I_z$ (m <sup>4</sup> )	0.001
$W_e$ (m <sup>3</sup> )	0.003
Peso Propio (kN/m)	2.312

**TABLA 6.11.:** Atributos sección re-dimensionada de las pilas verticales de la pasarela en arco

### 6.3.1.3 Arco y tablero de rigidez similar

Otra alternativa interesante además de combinar los tableros y arcos de rigidez diferente, es observar qué ocurre si ambos tienen una rigidez similar.

Las rigideces de ambos elementos en todos los casos dimensionados son muy diferentes ( $I_z^{arco} \lll I_z^{tablero}$ ) y como hemos definido en un primer momento que los tableros debe tener siempre 4 m de ancho, tomaremos el caso en el que la pasarela tendrá una mayor aceleración, que es cuando ambos elementos son poco rígidos.

Realizaremos las comprobaciones correspondientes como hemos realizado en las anteriores alternativas:

- ELV

Como era de esperar, obtenemos la máxima aceleración de todas las alternativas obtenidas hasta ahora, es decir, 0.65 m/s<sup>2</sup>. Valor entre el rango medio y de máximo confort.

- ELU

Observamos que cumplimos con la capacidad resistente tanto en el tablero, arco y pilas verticales.

### 6.3.2 Pasarela atirantada

En esta tipología de pasarela, consideraremos 2 alternativas; una primera con un tablero ortótropo y otra considerando un tablero mixto.

#### 6.3.2.1 Tablero ortótropo

- ELV

En este caso, debemos tener en cuenta que el tesado de los cables no afectará a las aceleraciones y al grado de confort de los peatones. En la siguiente figura puede observarse claramente como un aumento de tesado simplemente desplaza el gráfico de desplazamientos en el tiempo:

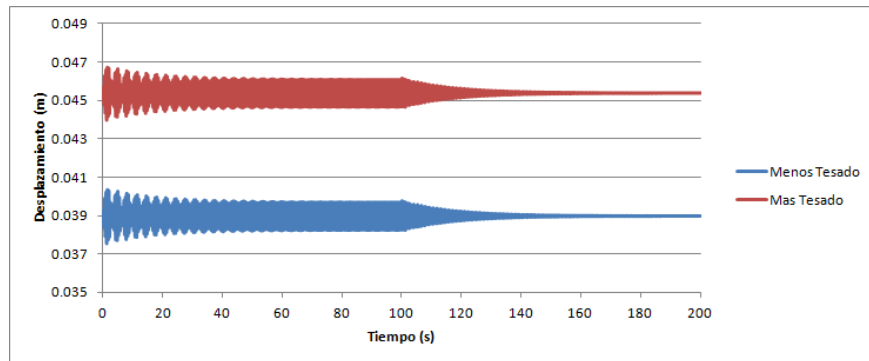


FIGURA 6.8.: Desplazamiento que sufre un punto de la pasarela atirantada cuando aumentamos el tesado.

Por otro lado, si aumentamos el área de los cables sí que se modifica las aceleraciones, además del desplazamiento:

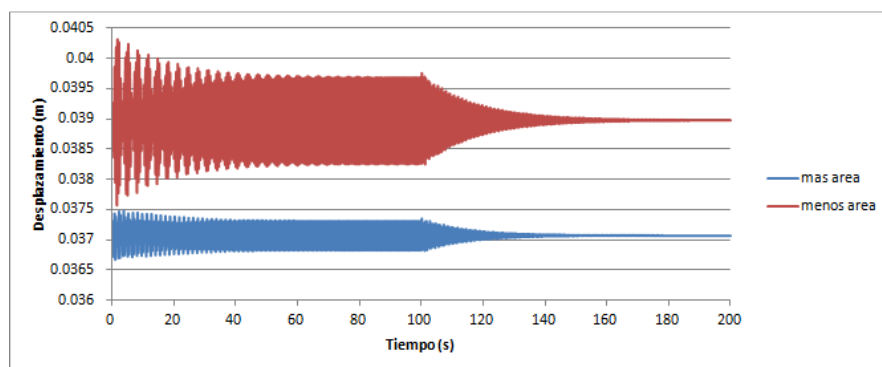


FIGURA 6.9.: Desplazamiento que sufre un punto de la pasarela atirantada cuando aumentamos el área del cable.

Consecuentemente, realizaremos la iteración sobre el área de los cables para lograr una mayor aceleración, puesto que con el área predimensionada, se obtiene como máximo una de valor  $0.252 \text{ m/s}^2$

Además, hemos considerado la eliminación de los cables T01 y TT06 debido a que su contribución en la capacidad de servicio y resistente a la pasarela es prácticamente nula.

- ELU

A diferencia de la pasarela en arco, en ésta hemos considerado que únicamente realizaremos una comprobación simple de resistencia en la pila ( $\sigma_h \leq 0.7 \cdot f'_{cd}$ ), ya que hemos considerado irrelevante la determinación de su armado o tesado, observando los objetivos de la presente tesina.

Observamos que, tanto en el tablero como para la pila, obtenemos unas tensiones inferiores a las resistentes.

### 6.3.2.2 Tablero mixto

Realizamos las mismas comprobaciones cuando el tablero es tipo mixto:

- ELV

Observamos que, para los cables predimensionados, obtenemos una aceleración máxima de  $0.08 \text{ m/s}^2$ . Esto nos indica que utilizar un tablero mixto nos produce una gran rigidez en el tablero.

Aunque el rango es relativamente pequeño, nos permitirá observar la diferencia entre alternativas. Igualmente, disminuyendo el área de los cables, observamos que prácticamente no tiene afectación sobre las aceleraciones, aumentándolas del orden de 3 milésimas. Por tanto, para garantizar además la capacidad resistente, tomaremos los cables que previamente hemos predimensionado para este caso.

- ELU

Realizamos la comprobación para esta alternativa, obteniendo los esfuerzos máximos en el tablero mixto, observamos que cumplimos tanto en el tablero como en la pila.

### 6.3.3 Pasarela pórtico

Finalmente, para este tipo de pasarela, consideraremos 2 alternativas; una primera con un tablero de hormigón pretensado donde el tablero es macizo y una segunda con el tablero aligerado.

Se tratará de la pasarela más rígida, especialmente por el hecho de ser de hormigón, hecho del cual esperamos que las aceleraciones máximas resulten ser las más pequeñas.

#### 6.3.3.1 Tablero pretensado en losa maciza

- ELV

Observamos que para la sección predimensionada, las aceleraciones resultantes en el punto más desfavorables son prácticamente despreciables, teniendo un máximo del orden de  $10^{-5}$ . Consecuentemente, reducimos el canto del tablero para hacerlo más flexible hasta los 0.25 m, la cual puede asemejarse a una banda tesa.

Finalmente consideraremos una sección del tipo:

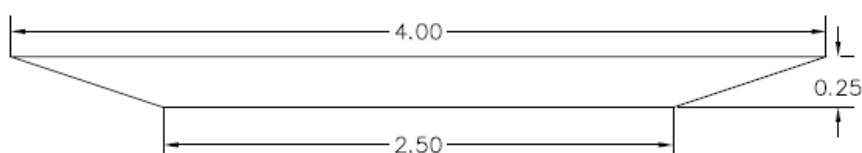


FIGURA 6.10.: Sección re-dimensionada de hormigón pretensado maciza. Cotas en metros.

Cuyos atributos:

Sección pretensada maciza	
Atributo	Valor
Área ( $m^2$ )	0.813
Área cortante ( $m^2$ )	-
$v_{inf}$ (m)	0.115
$v_{sup}$ (m)	0.135
$I_z$ ( $m^4$ )	0.753
$W_{e,z,+}$ ( $m^3$ )	0.153
$W_{e,z,-}$ ( $m^3$ )	0.179
$I_y$ ( $m^4$ )	0.004
Peso Propio (kN/m)	20.325

TABLA 6.12.: Atributos de la sección re-dimensionada de hormigón pretensado maciza.

Igualmente, al final obtenemos las aceleraciones más pequeñas de todas las alternativas, siendo del orden de  $10^{-3}$ ; aunque alejadas del posible error inherente que tiene el programa de cálculo en la determinación de aceleraciones.

- ELU

Observamos que cumplimos con la capacidad resistente tanto en el tablero como en las pilas.

#### 6.3.3.2 Tablero pretensado en losa aligerada

- ELS

Idénticamente a lo que sucede en la sección maciza pretensada, obtenemos unas aceleraciones máximas muy pequeñas en comparación al resto, aunque relativamente superiores a la losa maciza.

Planteamos aligerar la última sección obtenida del dimensionamiento del tablero macizo, obteniendo así:

Sección pretensada maciza	
Atributo	Valor
Área ( $m^2$ )	0.655
Área cortante ( $m^2$ )	-
$v_{inf}$ (m)	0.115
$v_{sup}$ (m)	0.135
$I_z$ ( $m^4$ )	0.673
$W_{e,z,+}$ ( $m^3$ )	0.200
$W_{e,z,-}$ ( $m^3$ )	0.171
$I_y$ ( $m^4$ )	0.004
Peso Propio (kN/m)	16.375

**TABLA 6.13.:** Atributos de la sección re-dimensionada de hormigón pretensado aligerada.

- ELU

Observamos que cumplimos con la capacidad resistente tanto en el tablero como en las pilas.

## 7. DETERMINACIÓN DE LA MÚSICA DE LAS PASARELAS

Una vez hemos dimensionado las pasarelas peatonales, procedemos a encontrar cual es la música que tienen de forma 'inherente' en su respuesta dinámica a una carga determinada.

En nuestro caso, haremos pasar a un peatón o carga móvil por el tablero y observaremos la respuesta dinámica. De esta respuesta dinámica, obtendremos las frecuencias, la energía y la amplitud relativa de la onda de desplazamientos a lo largo del tiempo.

Mediante las frecuencias, obtendremos qué sonido tiene el puente. Como éstas varían a lo largo del tiempo en función de la situación del peatón, podremos definir el "tempo" de la pasarela. Mediante la energía, observaremos relativamente en el tiempo las fases de mayor intensidad en el que el sonido se produce. Finalmente, con las amplitudes relativas de la onda de desplazamiento y las frecuencias, definiremos a qué timbre se aproximan las pasarelas peatonales.

Obviamente, el rango en el que se hallarán estas frecuencias distarán del rango audible del ser humano. Por tanto, fijaremos un modo de amplificación lineal para que se hallen dentro de este rango.

### 7.1 DEFINICIÓN DE LA CARGA MÓVIL

La carga móvil que utilizaremos simulará el paso de un peatón a lo largo de la pasarela.

Para modelizar los pasos que realiza el peatón en el programa de cálculo, debemos definir "n" cargas puntuales en cada nodo con un peso "p". La velocidad a la que avanza el peatón, será la velocidad de aplicación/desaplicación de cada carga a lo largo del tiempo.

Esta aplicación/desaplicación se define mediante una función triangular; donde en el momento en el que se halle en pico del triángulo, la aplicación de la carga será en su totalidad; mientras que en el resto del tiempo será únicamente parcial. En la siguiente figura 7.1. se muestra la metodología de aplicación:

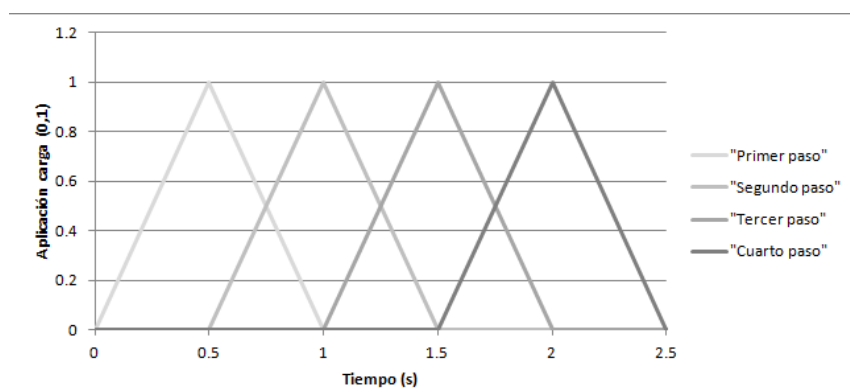


FIGURA 7.1.: Modelización del paso del peatón en el tiempo: aplicación/desaplicación de las cargas puntuales.

El ancho de cada triángulo dependerá de la velocidad a la que consideremos que avanza el peatón. Considerando que el peatón avanza 1 metro en cada paso y una velocidad de unos 5 km/h, el tiempo que tarda en dar un paso o el ancho de cada triángulo serán 1.388 segundos.

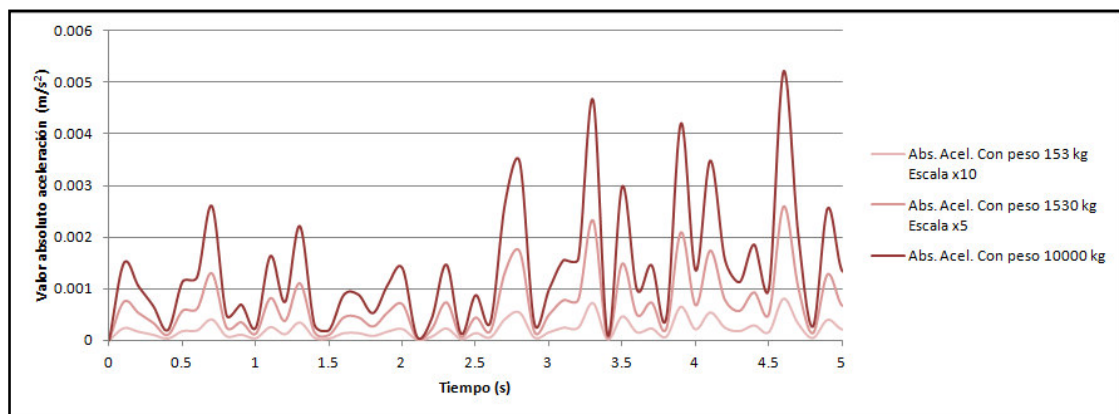
Por otro lado, el valor de cada carga la consideraremos el peso total del peatón, ya que consideramos la hipótesis en que hay un instante en que el peatón sólo tiene un pie apoyado en el suelo, que es cuando el valor del triángulo es igual a 1.

## 7.2 RESPUESTA DINÁMICA

Obviamente, las aceleraciones que obtenemos mediante esta carga son mucho menores que las que hemos obtenido en el dimensionamiento, si consideramos que el peso móvil está entre los 70 kg y los 120 kg.

La aceleración máxima para la alternativa más flexible, que es la pasarela con arco y tablero poco rígidos, está en el orden de  $1 \times 10^{-4}$  y  $1 \times 10^{-3} \text{ m/s}^2$ .

Aun así, se observa que el valor de las aceleraciones aumenta linealmente a las cargas que aplicamos, como puede observarse en la figura 7.2.:



**FIGURA 7.2.:** Linealidad de las aceleraciones en base a la carga aplicada.

Consecuentemente, si obtenemos unas aceleraciones del SAP2000 cuyo rango está por debajo del error inherente de cálculo, podemos calcularlas mediante una carga mucho mayor, posteriormente obtener estas aceleraciones y reducirlas de escala en un programa de cálculo de mayor precisión.

Por otro lado, consideramos óptimo la lectura de estas aceleraciones en su punto más desfavorable o de máximos desplazamientos; los cuales serán los mismos que los definidos en el proceso de dimensionamiento.

## 7.3 OBTENCIÓN DE LAS FRECUENCIAS Y ENERGÍA EN EL TIEMPO

El programa de cálculo, nos da como respuesta a una carga dinámica los valores de desplazamiento, velocidad, aceleración y energía en el tiempo para un punto en concreto de la pasarela.

- **Frecuencias**

La onda resultante de desplazamientos en el tiempo, es una suma de Fourier de  $n$  curvas diferentes con sus  $n$  frecuencias. En cuanto menos compleja sea la geometría de la pasarela, la respuesta dinámica tendrá menos armónicos y por tanto menor variación en la curva de frecuencias. Por ejemplo, si únicamente tuviese un armónico, la función de desplazamiento tendría la siguiente forma (**Sétra 2006**):

$$x(t) = A \cdot e^{-\xi \omega_0 t} \cdot \cos(\omega_a t - \varphi) + x_{SP}(t)$$

Siendo  $e^{-\xi \omega_0 t}$  la componente del amortiguamiento y  $x_{SP}(t)$  la solución particular de la ecuación (movimiento permanente).

Podríamos aproximar la suma de Fourier utilizada en el cálculo del SAP2000 mediante las frecuencias obtenidas en los modos propios de vibración, pero nuestro objetivo es obtener la melodía de la pasarela a lo largo del tiempo.

Cabe añadir que como utilizaremos un método numérico para su obtención y al ser la onda en la curva de desplazamiento prácticamente inapreciable, podemos obtener también estas frecuencias de la curva de aceleraciones al estar éstas claramente definidas; al ser la segunda derivada de la de desplazamientos:

$$a(t) = \frac{d^2 x(t)}{dt^2} = -A \cdot (\xi \cdot \omega_a \cdot \omega_0)^2 \cdot e^{-\xi \omega_0 t} \cdot \cos(\omega_a \cdot t - \varphi) + \frac{d^2 x_{SP}(t)}{dt^2}$$

Gráficamente, podemos observar:

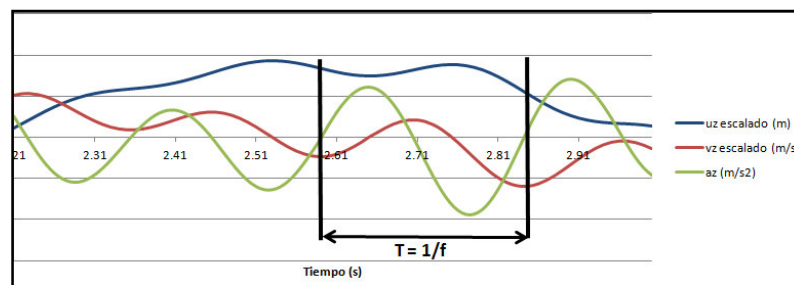


FIGURA 7.3.: Observación forma curvas desplazamiento, velocidades y aceleraciones.

Por tanto, puede observarse que es indiferente de qué variable obtengamos las frecuencias en el tiempo.

Adicionalmente, como se ha visto en el anterior apartado, también es indiferente la carga que apliquemos a la estructura, puesto la frecuencia a lo largo del tiempo que obtengamos siempre será la misma.

Este hecho nos facilitará la obtención de las frecuencias para los casos en donde la pasarela tenga unas aceleraciones muy pequeñas al estar muy sobredimensionada.

De esta forma, obtenemos la siguiente historificación de frecuencias en el tiempo para cada una de las alternativas:

- Arco

Obtenemos las siguientes frecuencias en el tiempo:

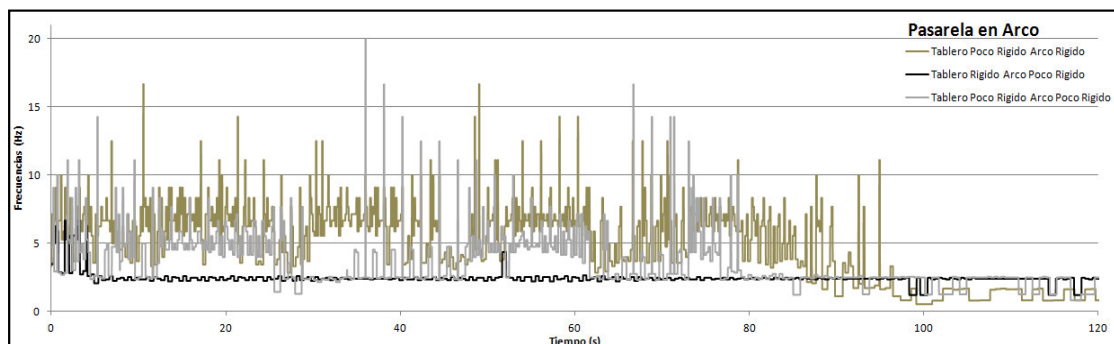


FIGURA 7.4.: Frecuencias (Hz) en el tiempo para las alternativas de la pasarela en arco

Como puede apreciarse, el tablero al tener en cualquier caso una rigidez muy superior a la del arco, es mucho más difícil de mover y actúa prácticamente como una viga continua, la cual

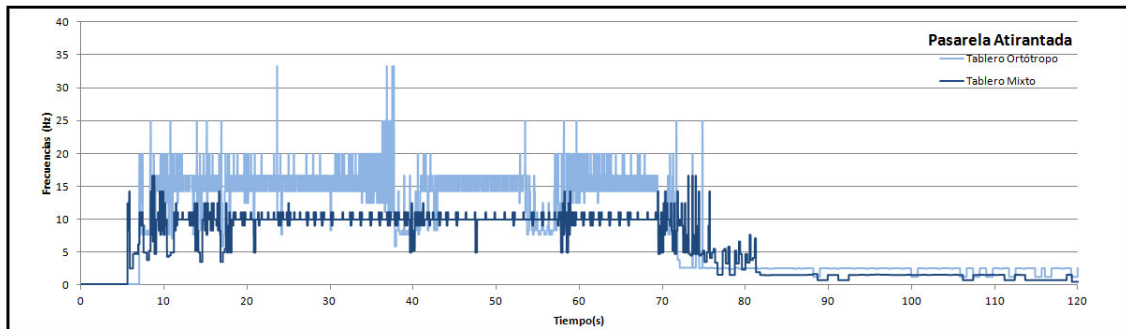


tienen pocos grados de libertad y por ese motivo la historia de frecuencias es monótona y prácticamente constante.

Cuanto menos rígido sea el tablero, y al tener el arco en general una geometría compleja, la variación de frecuencias es mucho mayor.

- Atirantado

Se observan las siguientes frecuencias en el tiempo:

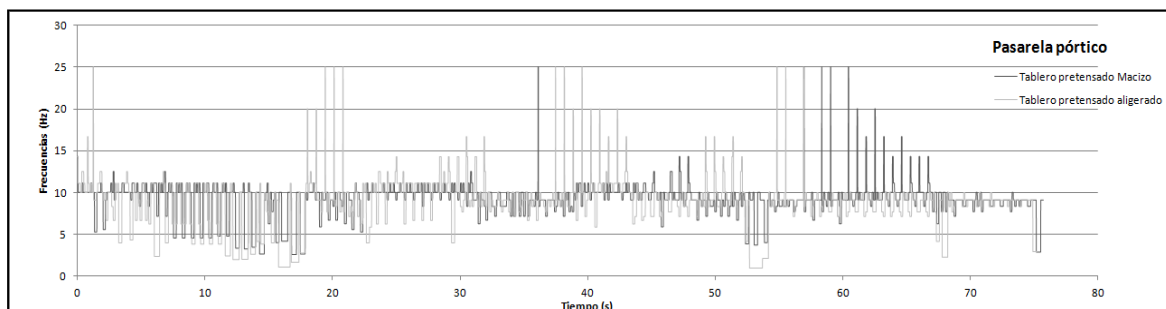


**FIGURA 7.5.:** Frecuencias (Hz) en el tiempo para las alternativas de la pasarela atirantada.

Podemos ver como ambas tipologías de tableros actúan de forma similar; aunque el incremento de masa que tiene el tablero mixto, hacen que su capacidad de movimiento se vea reducida, aunque como se observa en el gráfico de energía, esto le hace más inestable a mayores aceleraciones.

- Pórtico

Se observan las siguientes frecuencias en el tiempo:



**FIGURA 7.6.:** Frecuencias (Hz) en el tiempo para las alternativas de la pasarela pórtico.

Puede observarse claramente como es la pasarela más "sencilla" debido a la monotonía de las frecuencias en el tiempo.

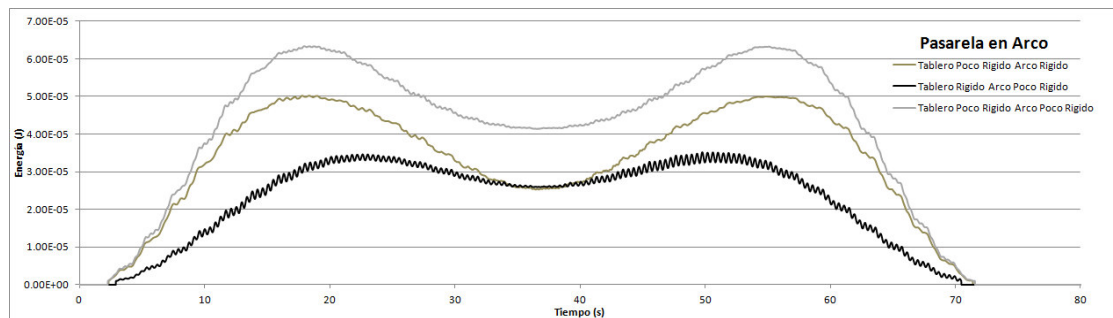
- Energía

Mediante el SAP2000 podemos obtener la energía que tiene la pasarela en su conjunto a lo largo del tiempo.

Nos ayudará a observar en qué momento la masa de la pasarela se halla más acelerada, y por tanto, nos dirá relativamente en qué momento habría mayor intensidad sonora.

Se observa para cada alternativa

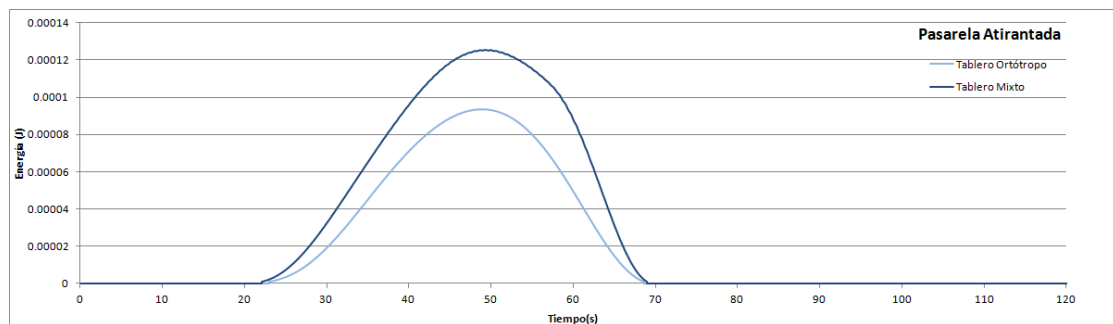
- Arco



**FIGURA 7.7.:** Energía (J) en el tiempo para las alternativas de la pasarela en arco.

Podemos observar un claro aumento de la energía cuando el peatón circula por los puntos de máximo movimiento (a  $L/4$ ). La diferencia entre alternativas queda marcada las diferentes aceleraciones debido a la diferencia de rigidez

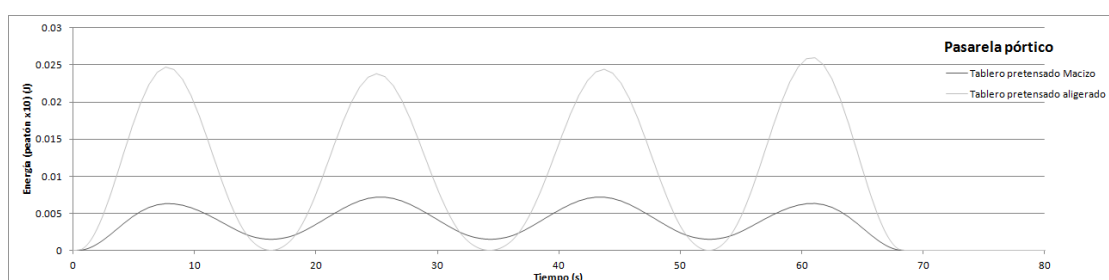
- Atirantado



**FIGURA 7.8.:** Energía (J) en el tiempo para las alternativas de la pasarela atirantada.

Cabe recordar que para el caso del tablero mixto, aunque tenga una masa superior al tablero ortótropo, hemos realizado la hipótesis que en las regiones de momento negativo la inercia del hormigón tenía una contribución nula. Este hecho provoca que la rigidez de esta última sea considerablemente menor que la ortótropa; por lo que el programa de cálculo SAP2000 lo traduce a una mayor flexibilidad y mayor energía en absoluta.

- Pórtico



**FIGURA 7.9.:** Energía (J) en el tiempo para las alternativas de la pasarela pórtico.

Finalmente, observamos que en este caso, a rigideces prácticamente idénticas pero una disminución de masa por parte de la aligerada; el tablero de mayor masa tiene una aceleración inferior y por tanto una menor flexibilidad.

## 7.4 AMPLIFICACIÓN DE LAS FRECUENCIAS Y ENERGÍA: RANGO AUDIBLE

### 7.4.1 Rango audible

El rango audible es aquél en el que el ser humano es capaz de percibir sonidos. Las dos variables que definen el rango audible son las frecuencias y el nivel de presión sonora. Este rango queda claramente definido en la siguiente figura x.x. (Estévez 1990):

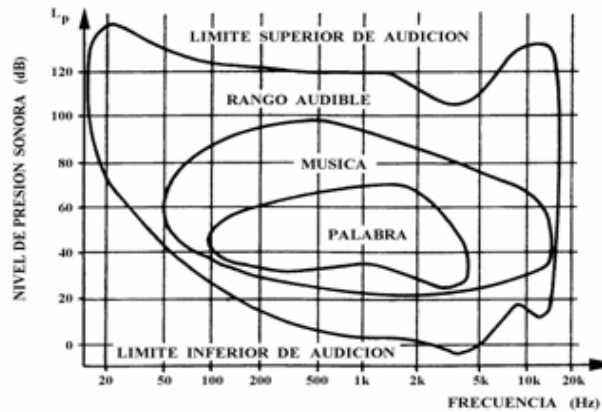


FIGURA 7.10.: Rango audible para el ser humano.

Nuestro rango de frecuencias, que oscila entre los 2 y 30 Hz, distan de poderse percibir por parte del ser humano como "música".

Por otro lado, el nivel de presión sonora dependerá del medio o instrumento sobre el que propaguemos el sonido.

Como se ha descrito en el objetivo de la tesina; la pasarela, por su naturaleza de sus materiales, no sería capaz de producir los sonidos generados por una excitación exterior. Por tanto, consideraremos un nivel de presión sonora relativo a la energía de cada una de las alternativas. Posteriormente, en el apartado de "timbre" de las pasarelas, hallaremos a qué instrumento o modo de propagación se asemeja más cada una de ellas.

### 7.4.2 Amplificación de frecuencias y energía

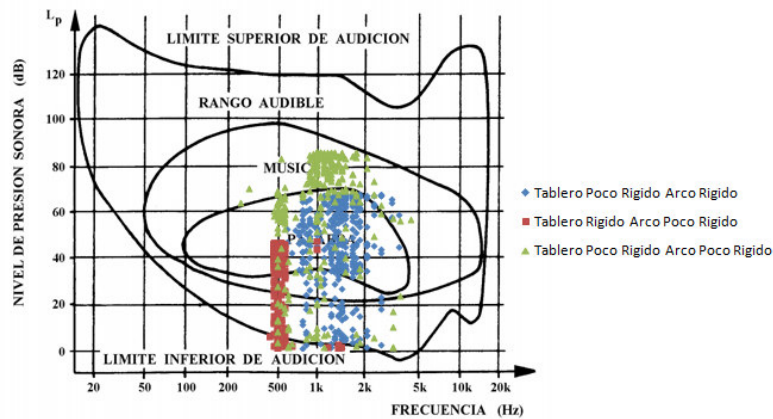
El modo mediante el cual amplificaremos las frecuencias será simplemente multiplicarlas por una constante idéntica para cada una de ellas. Del mismo modo que lo haremos con la energía para establecer una relación relativa entre frecuencias halladas dentro del rango audible. Para escoger el valor óptimo de la constante de amplificación de frecuencias, nos hemos fijado los 3 siguientes objetivos:

- Debe hallarse en un rango entre los 50 Hz y los 10000 Hz.
- La frecuencia ampliada debe asemejarse lo máximo posible a las notas definidas en la clave bien temperada; es decir, el "afinamiento" debe ser lo más esmerado posible.
- La pasarela debe tener energía potencial diferente de 0.

Como cada pasarela tiene un comportamiento significativamente diferente, determinaremos una constante para las alternativas del arco, otra para las del atirantado y una última para las del pórtico. Aunque, el valor de las mismas tenderá a asemejarse para poder apreciar una diferencia entre ellas:

- Arco

Se determina que mediante una constante igual a **199** obtenemos un error de afinamiento del **1.19%**, mediante la cual centramos las frecuencias dentro del rango audible:

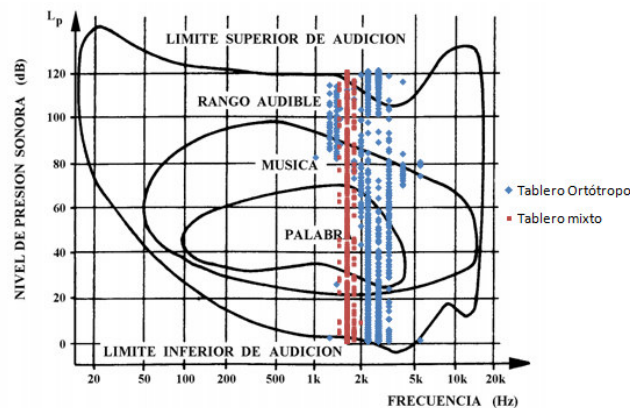


**FIGURA 7.11.:** Distribución de frecuencias ampliadas en la pasarela en arco.

Observamos como la melodía de la pasarela en arco con tablero rígido hará que sus notas sean más graves, mientras que en el caso donde el tablero es poco rígido y el arco es rígido hay mayor inestabilidad estructural.

- Atirantado

Se determina que mediante una constante igual a **175** se obtiene un error del afinamiento del **1.08%**; donde observamos que el rango de frecuencias se hallará igualmente ligeramente por encima de la pasarela en arco:

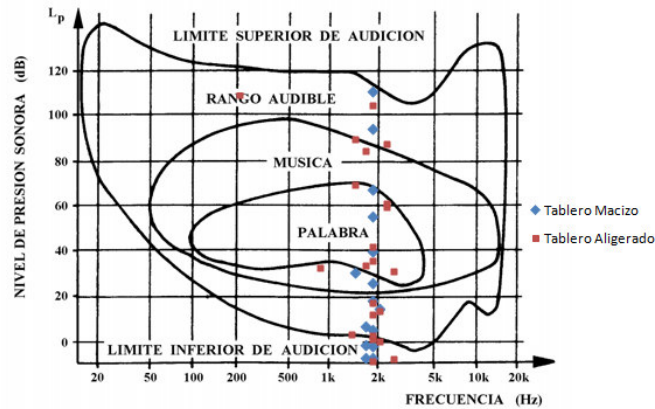


**FIGURA 7.12.:** Distribución de frecuencias ampliadas en la pasarela atirantada.

Observamos generalmente una melodía uniforme, siempre alrededor de los 2000 Hz; mientras que el caso del tablero mixto tendremos una melodía más grave que la del tablero ortótropo.

- Pórtico

Se determina que mediante una constante igual a **175** se obtiene un error del afinamiento del **1.12%**. Obtenemos en este caso un rango de frecuencias mucho menor debido a la sencillez de la geometría estructural:



**FIGURA 7.13.:** Distribución de frecuencias ampliadas en la pasarela pórtico.

Tenemos un efecto aún más acentuado del caso de la pasarela atirantada; debido especialmente a la sencillez geométrica que tiene la pasarela pórtico.

## 7.5 DEFINICIÓN DEL TEMPO

Otra de las variables fundamentales en la definición de la música es el tiempo o "tempo". La notación que indica la duración de cada nota musical es la siguiente:

Notación	Nombre	Duración	Silencio
	Cuadrada	8 tiempos	
	Redonda	4 tiempos	
	Blanca	2 tiempos	
	Negra	1 tiempo	
	Corchea	1/2 tiempos	
	Semicorchea	1/4 tiempos	
	Fusa	1/8 tiempos	
	Semifusa	1/16 tiempos	

**TABLA 7.1.:** Definición de los tiempos asignados a cada nota musical.

Como se observa, el tiempo o duración es relativo a la duración de la negra, la cual tiene tiempo = 1.

En música, el tempo que tiene una obra se define indicando el número de negras por minuto. Es decir, si se desea que una negra dure 1 segundo, el tempo será de 60. En este caso, la corchea durará 0,5 segundos, la semicorchea 0,25 y así sucesivamente.

Además existe la posibilidad de añadir el "punto" a cada figura, por lo que se incrementa la mitad de su tiempo original. Es decir, si por ejemplo una corchea de 0.5 segundos tiene un

punto, su duración real será de 0.75 segundos; si una negra de 1 segundo tiene un punto, su duración real será de 1.5 segundos.

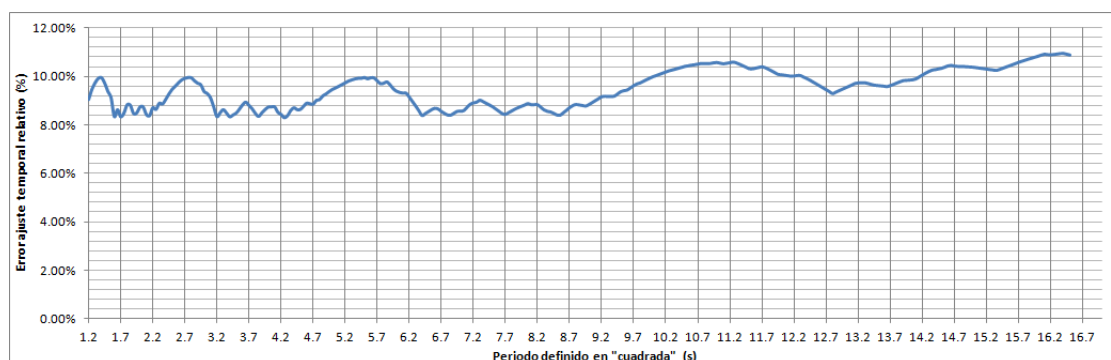
En definitiva, tenemos un total de **17 duraciones** establecidas en cada figura musical (contando con punto y sin punto).

La forma en la que nosotros elegimos la duración de las notas; se basará en el período, que a su vez, es el inverso de la frecuencia. Es decir, las frecuencias más graves siempre durarán más que las agudas.

Como los períodos que hemos obtenido no cumplen con los tiempos asignados a cada figura musical, hemos realizado un ajuste que busca el mínimo error o desfase temporal.

La variable de cambio hemos considerado el tiempo asignado a la "cuadrada", de la cual se determinarán todo el resto de duraciones. Este tiempo, no debe ser superior al período máximo que se observe, que son 1.2 segundos.

Se observa que la evolución del error es el siguiente:



**FIGURA 7.14.:** Evolución del error en base al período establecido en la "cuadrada".

Se determina que el tiempo óptimo a asignar para la figura "cuadrada" son 1.6 segundos, de la que se obtiene un desfase promedio del 8.28%. Finalmente tenemos los siguientes períodos:

Figura musical	Nº de tiempos	Duración (s)
Cuadrada	8	1.6
Redonda Punto	6	1.2
Redonda	4	0.8
Blanca punto	3	0.6
Blanca	2	0.4
Negra punto	1.5	0.3
Negra	1	0.2
Corchea Punto	0.75	0.15
Corchea	0.5	0.1
Semicorchea punto	0.375	0.075
Semicorchea	0.25	0.05
Fusa punto	0.1875	0.0375
Fusa	0.125	0.025
Semifusa punto	0.09375	0.01875
Semifusa	0.0625	0.0125

**TABLA 7.2.:** Tempo asignado.

Consecuentemente, tenemos un tempo de 300 negras por minuto, si consideramos la escala de tiempo real.

El tempo queda representado en las partituras mediante el símbolo  $\text{♩} = 300$  en el inicio de las mismas.

## 7.6 TIMBRE DE LAS PASARELAS

El timbre o "color de los sonidos" de un instrumento en particular está determinado por un ámbito de frecuencias de alturas sonoras fijas llamado "ámbito de formantes", compuesto de sonidos parciales con sus respectivas amplitudes (**Estévez 1990**).

Es decir, un sonido en particular no puro siempre está formado por más de una frecuencia (una serie de Fourier) donde cada una de ellas se expone en base de su amplitud. Este timbre es particular para cada instrumento, en base a cómo se distribuyen sus partículas por el mismo, pues un la3 no suena igual en un violín que en una flauta, por ejemplo. En la siguiente figura 7.15. puede observarse la distribución de formantes en distintos instrumentos si todos ellos se hallan en una misma nota:



FIGURA 7.15.: Diferentes timbres para una misma nota. Fuente McGraw Hill

Como se observa, el diapasón emite siempre un sonido puro, que es el La3 (440 Hz) mientras que el resto de sonidos están formados también por otras frecuencias (los formantes). Podríamos obtener de forma aproximada el timbre de nuestras pasarelas observando la dispersión entre frecuencia y amplitud relativa de la onda de desplazamiento. Posteriormente, compararemos con los timbres de otros instrumentos para observar a cuál de ellos se asemejan de forma relativa.

- Arco

Se observa la siguiente distribución de formantes:

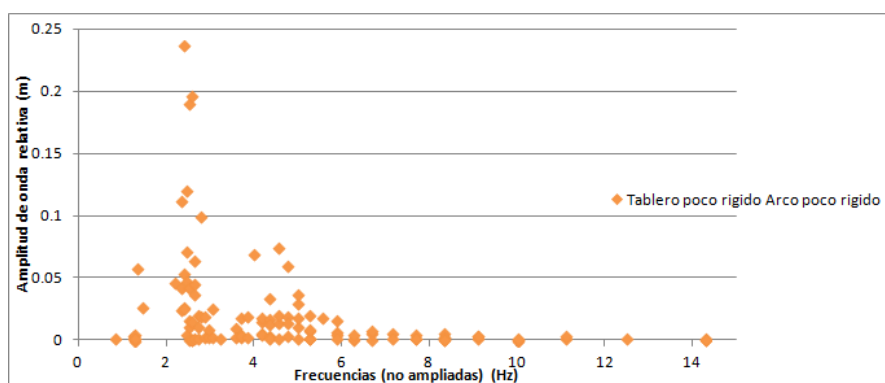
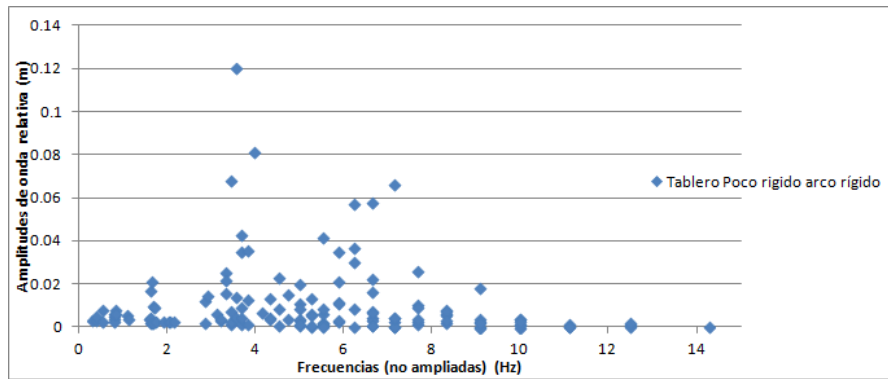
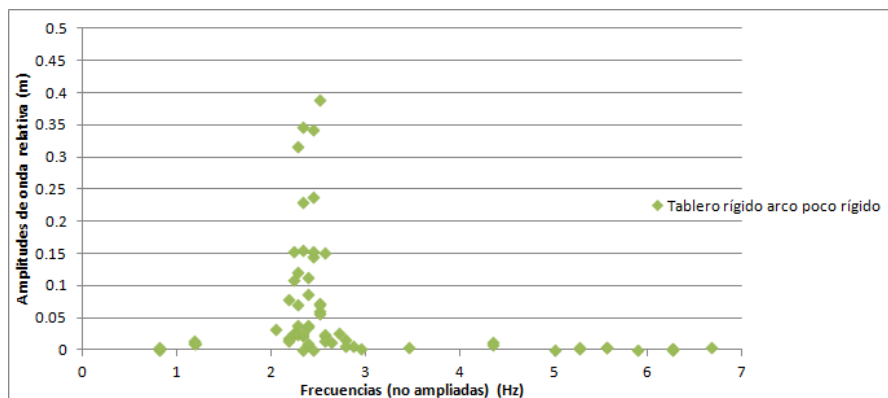


FIGURA 7.16.: Distribución formantes pasarela en arco con tablero y arco poco rígidos.



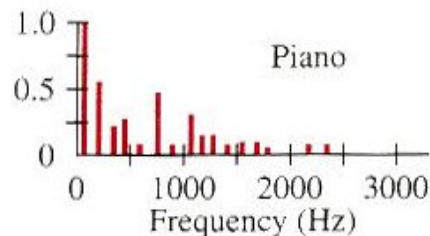


**FIGURA 7.17.:** Distribución formantes pasarela en arco con tablero poco rígido y arco rígido.



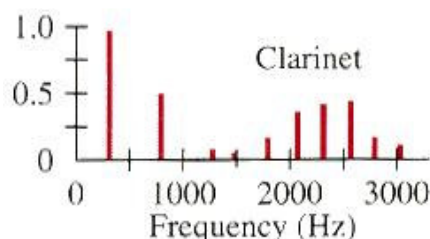
**FIGURA 7.18.:** Distribución formantes pasarela en arco con tablero rígido con arco poco rígido.

Las envolventes de cada una de las alternativas nos ayudan a observar a qué tipo de instrumento puede asemejarse. Por ejemplo, el primer caso del tablero y arco poco rígidos, encontramos una similitud muy cercana con el timbre del piano:



**FIGURA 7.19.:** Timbre del piano.

La segunda, es similar a un timbre de un instrumento de viento, como lo sería el clarinete; pero hemos considerado que es más bien "bajo" al tener los formantes prácticamente igual de graves que el piano:



**FIGURA 7.20.:** Timbre del clarinete

Finalmente, vemos que la variabilidad de las frecuencias en el último caso es muy baja, donde el tablero es rígido. Podríamos aproximarlos en un diapasón o un instrumento de percusión afinado, como es el caso del xilófono.

- **Atirantado**

Se observa la siguiente distribución de formantes:

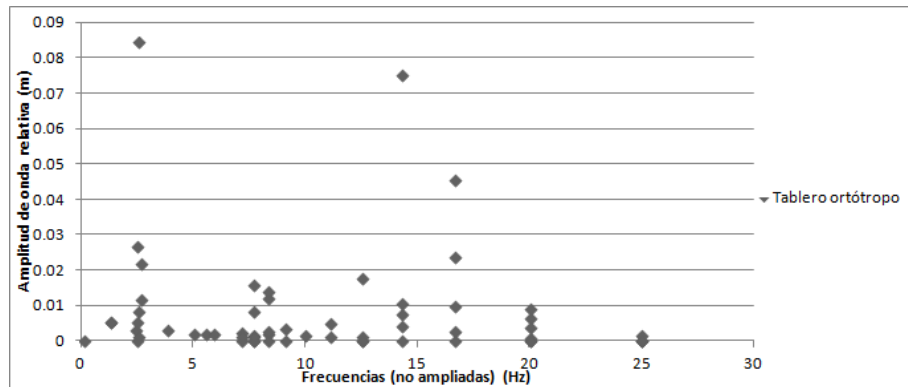


FIGURA 7.21.: Distribución formantes pasarela en atirantada con tablero ortótropo.

Observamos una distribución prácticamente uniforme y en algunos casos aleatoria, sin quedar claro qué frecuencia nota es la dominante. Este hecho sucede habitualmente con los instrumentos de viento, como el oboe cuyo timbre se muestra en la siguiente figura:

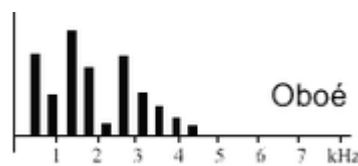


FIGURA 7.22.: Distribución formantes oboé

La alternativa con el arco mixto también tiene una distribución muy similar como se observa en la siguiente figura 7.23., aunque con una tendencia más grave que el anterior:

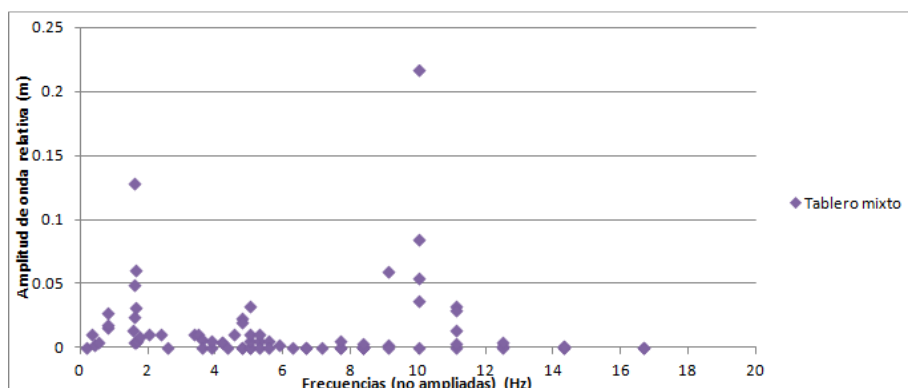


FIGURA 7.23.: Distribución formantes pasarela en atirantada con tablero mixta.

Sería lógico que si hemos aproximado el timbre de la pasarela atirantada con arto ortótropo a un instrumento de viento como el oboe, a la mixta siendo más grave lo aproximemos, por ejemplo, al fagot.

- **Pórtico**

Se observa la siguiente distribución de formantes para la losa maciza:

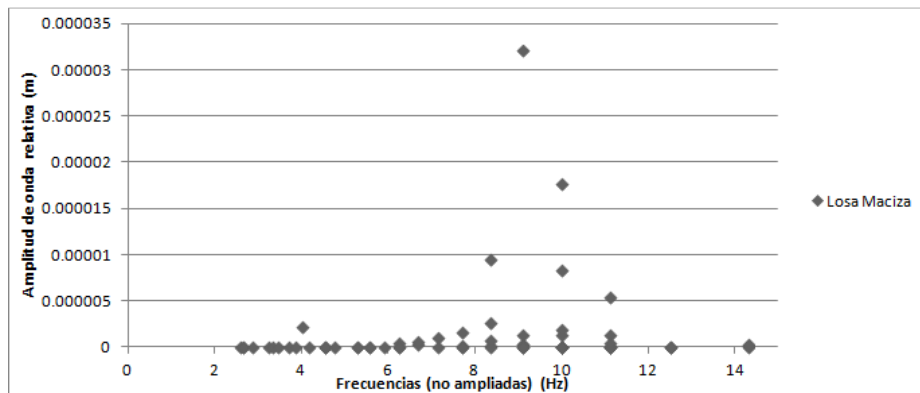


FIGURA 7.24.: Distribución formantes pasarela pórtico con losa pretensada maciza.

Tenemos una distribución muy aleatoria donde nos haría muy difícil localizar el instrumento que se parece en cuestión.

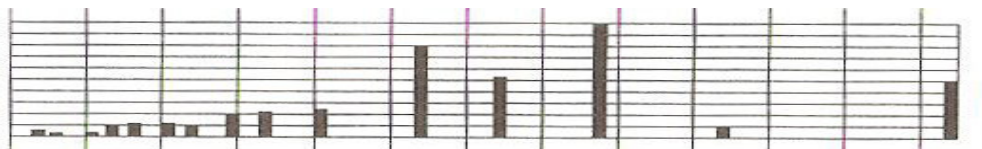


FIGURA 7.25.: Distribución formantes clarinete agudo.

Por otro lado, para el caso de la losa pretensada aligerada:

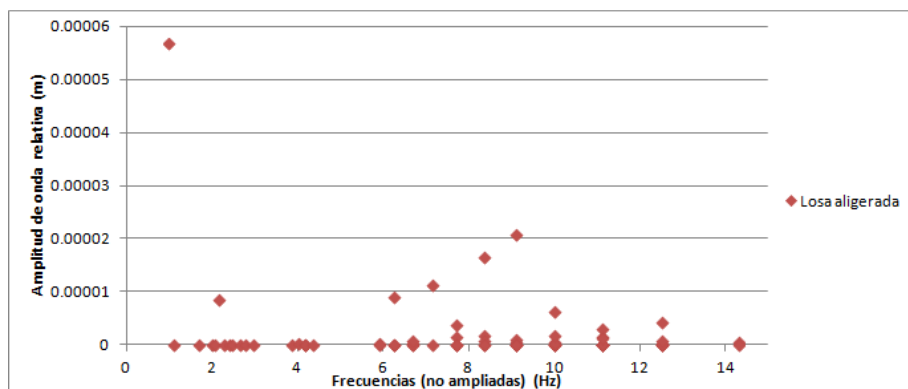


FIGURA 7.26.: Distribución formantes pasarela pórtico con losa pretensada aligerada.

Observamos que prácticamente es idéntico que el caso de la losa maciza. De forma aproximada, podemos observar que se asemeja al timbre de la flauta. Esta elección nos ayudará a comparar ambas alternativas al ser las dos instrumentos de viento y madera:

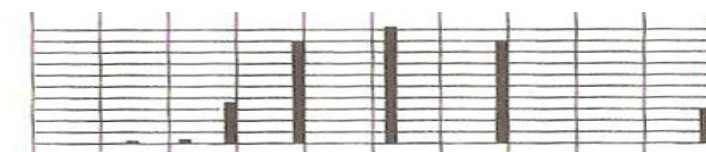


FIGURA 7.27.: Distribución formantes flauta.

## 7.7 REPRESENTACIÓN EN PARTITURAS

La forma en la que representaremos los resultados, serán escribiéndolos en las partituras, las cuales pueden leerse en el anejo 2.

La notación utilizada y que cabe describir, estará representada por varios elementos; los cuales están descritos en a continuación:

- Pentagrama

El Pentagrama es el elemento principal de la partitura y es donde se escriben las notas musicales. En la siguiente figura 7.28 puede observarse un ejemplo de representación de la escala de do cromática:



FIGURA 7.28.: Pentagrama con la representación de la escala de do diatónica.

La lectura del anterior pentagrama sería Do, Do#, Re, Re#... Al ser la escala de Do, entre el mi y el fa y el si y el do ya existe un semitono.

El # indica que la nota diatónica está sostenida (un semitono más). Resultaría idéntico añadiéndole un  $\flat$  pues sería restarle un semitono a la nota diatónica (un semitono menos).

- Claves

Las claves que hemos utilizado son la de *sol en segunda* si las frecuencias son generalmente agudas (la segunda línea del pentagrama es sol) y la clave de fa en cuarta si las frecuencias son generalmente graves (la penúltima línea del pentagrama es fa):



FIGURA 7.29.: Claves utilizadas.

- Compases

En cualquier caso, hemos utilizado el compas de 4/4 (en cada compás hay 4 tiempos), indicando en el inicio de la partitura:



FIGURA 7.30.: Compás utilizado.

- Tempo

Se ha descrito en el apartado correspondiente la notación utilizada para representar la duración de cada nota y el tempo utilizado.

- Matriz dinámico

Indica el grado de intensidad en el que el músico debe interpretar las partituras. Se utiliza la siguiente notación:

Nombre	Abreviatura	Significado
Pianissimo	<i>pp</i>	Intensidad muy débil.
Piano	<i>p</i>	Intensidad débil.
Mezzopiano	<i>mp</i>	Intensidad medianamente débil.
Mezzoforte	<i>mf</i>	Intensidad medianamente fuerte
Forte	<i>f</i>	Intensidad fuerte
Fortissimo	<i>ff</i>	Intensidad más fuerte
Fortississimo	<i>fff</i>	Intensidad muy fuerte
Crescendo	<	A medida que avanza el tiempo, la intensidad aumenta.
Decrescendo	>	A medida que avanza el tiempo, la intensidad disminuye.

TABLA 7.3.: Tempo asignado.

Obviamente, esta variable siempre es subjetiva y depende de la interpretación del músico.

## 8. CONCLUSIONES

A grandes rasgos, podemos identificar las diferentes fases de cada una de las piezas musicales que hemos obtenido:

1. **Arco con tablero y arco poco rígidos:** Entre las alternativas del arco, es la que más se observa la diferencia de cada una de las fases, al ser la más "expuesta" a las fuerzas exteriores. En una fase inicial, cuando el peatón se halla entre el punto inicial y  $L/4$ , tenemos un crescendo y observamos cómo la melodía va volviéndose cada vez más caótica y anárquica, llegando a su cénit cuando el peatón se encuentra en el punto de máximas aceleraciones.  
Entre  $L/4$  y  $L/2$ , observamos un decrescendo donde la melodía se vuelve cada vez más monótona y con menos color; hasta que, entre  $L/2$  y  $3L/2$  vuelve el crescendo encontrándonos de nuevo con el fenómeno entre el punto inicial y  $L/4$ . En una fase final, volvemos a observar un decrescendo donde la melodía muere en la monotonía.
2. **Arco con tablero poco rígido y arco rígido:** Observamos un fenómeno muy similar al anterior caso; pero en este, en prácticamente todas las fases, la melodía es más caótica. Esto nos demuestra que esta pasarela es más difícil que entre en resonancia que la anterior; pues es más difícil lograr que la misma vibre a una única frecuencia, debido a que ha aumentado la complejidad del movimiento de la pasarela.
3. **Arco con tablero rígido y arco poco rígido:** A diferencia de las anteriores alternativas, en esta observamos que la melodía es mucho más monótona, se centra siempre en un conjunto de notas musicales. Esto es consecuencia a que prácticamente el único elemento que vibra en toda la pasarela es el tablero, asemejándose a una única viga bi-apoyada. Esto se traduce a una menor complejidad estructural y consecuentemente a un menor número de grados de libertad (y por tanto, mayor peligro de resonancia), lo que hace que vibre produciendo pocas notas.
4. **Atirantada con tablero ortótropo:** Observamos un fenómeno muy similar a las alternativas del arco. En este caso, hay un gran silencio inicial que es cuando el peatón avanza sobre la losa de contra-peso. Cuando ya se encuentra en la luz principal, la melodía comienza de forma monótona, y no es hasta que el peatón se encuentra cerca del punto de máximas aceleraciones que ésta consigue más color; posteriormente se vuelve más monótona y de nuevo consigue mayor diversidad cuando se encuentra en el punto análogo de máximas aceleraciones, para posteriormente ir muriendo en la monotonía.
5. **Atirantada con tablero mixto:** Lo que se escucha es prácticamente idéntico a la alternativa con el tablero ortótropo, pero la melodía es más pausada y más grave que la anterior, debido al incremento de masa del propio tablero el cual es más difícil de acelerar. Observamos mayor monotonía en la melodía que las alternativas del arco, pues la contribución que realizan los cables es poca para aumentar la complejidad de movimiento de la luz principal del tablero.
6. **Pórtico con losa maciza:** Es la alternativa de la que obtenemos menor color en su melodía, además de ser también la más pausada. Esto es consecuencia de ser la que más masa tiene de todas las alternativas y ser la que tiene una geometría más sencilla. Además, podemos escuchar crescendos y decrescendos a medida que el peatón se va encontrando los puntos de máximas aceleraciones.

7. **Pórtico con losa aligerada:** Observamos que la melodía para este caso no es tan pausada, aunque sigue siendo igual de monótona que la anterior. Además, llama la atención los grandes incrementos de potencia musical entre los puntos de máximas aceleraciones y los de mínimas aceleraciones, en comparación a la losa maciza. Esto es debido a que una menor masa es mucho más sencilla de amortiguar que una de mayor. Cuando el peatón se encuentra en las zonas de poco movimiento, la pasarela ya ha sido capaz de amortiguar la aceleración anterior, hecho que no sucede con la anterior alternativa.

Las obras musicales que hemos obtenido no se hallan dentro de lo que se denominaría "oído occidental", el cual ha sido educado durante siglos por unos patrones de los que hemos acabado acostumbrándonos. Aunque, igual que hizo Bach en el siglo XVII con su clave bien temperado, nos hemos basado en las matemáticas y en la física para obtener una melodía determinada.

Entonces, ¿por qué no sería música, la música de los puentes? Citando a Gregory Bateson (Cage 1996) *"Todo lo que no es información, no es redundancia, no es forma y no es restricción, es ruido, la única posible fuente de nuevos patrones"*.

## 9. AGRADECIMIENTOS

Agradecer a mis tutores: Ángel Carlos Aparicio, Marta Sarmiento y M<sup>a</sup> Lluïsa Espigolé por las guías que me han facilitado para conseguir el objetivo. También a Adrià Cabrero por aguantarme y solventarme todas las dudas relacionadas con el dimensionamiento de las pasarelas.

A mis padres y familia, que sin ellos nunca hubiera llegado a estar donde estoy.

A Sofía Lucas, cuyo apoyo me ha ayudado siempre a seguir hacia delante.

A todos aquellos que me inspiraron.

## 10. BIBLIOGRAFÍA

- **Andueza Olmedo, María (2010)** *"Creación, sonido y ciudad: Un contexto para la instalación sonora en el espacio público"* Memoria para optar al grado de doctor. Facultad de Bellas Artes, Universidad Complutense de Madrid.
- **Cage, John (1996)** *"Visual Art. John Cage en conversación con Joan Retallack"* Ediciones / metales pesados. Chile 2011
- **Casadevall, David (2007)** *"Órgano de mar en Zadar"* Blog acusticaweb.com publicado el 1 de mayo
- **Casadevall, Jordi (2008)** *"Instrumentos Baschet"* blog acusticaweb.com categoría acústica musical publicado el 17 de septiembre.
- **Crowell, Benjamin (1998)** *"Chapter 18. Resonance"* Light and Matter lightandmatter.com
- **EAE (2011)** *"Instrucción de Acero Estructural. Con comentarios de los miembros de la Comisión Permanente de Estructuras de Acero"* Ministerio de Fomento, Madrid.
- **EHE (2008)** *"Instrucción de Hormigón Estructural. Con comentarios de los miembros de la Comisión Permanente del Hormigón"* Ministerio de Fomento, Madrid.
- **Estévez, Francisco (1990)** *"Acústica musical"* Opera Tres. Ediciones Musicales. Madrid.
- **Gorbatt, Alberto (2011)** *"Paseo del Viento: Costa de Vicente López"*. Aqua.com publicado el 11 de septiembre
- **González Serrano, Antonio (2004)** *"Pasarela atirantada 'La Rosa' en La Coruña"* Revista de Obras Públicas nº 3443
- **IAP (2011)** *"Instrucción sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de carretera (IAP-11)"* Boletín oficial del estado (BOE) viernes 21 de octubre de 2011, Madrid.
- **Jantzen, Michael (2012)** *"Sounds of the Sun"* Pavilion michaeljantzen.com
- **Manterola, Javier (2006)** *"Puentes: Apuntes para su diseño, cálculo y construcción"* Vol I, II Colección escuelas, Madrid.
- **Manterola, Javier (2012)** *"El arte y los puentes"* Fabrikart, ehues
- **Martín, Galo (2013)** *"La Bretaña francesa: El bosque de Brocéliande"* zoomnews.com, publicado el 7 de julio
- **Mattheus, Dennis (1972)** *"Bach y Händel. La música para teclado"*. Madrid.
- **Metzger, Christoph (2000)** *"Aspectos de una historia no escrita de las instalaciones sonoras"* publicado en ccapitalia.net Berlín, 10 de julio



- **Nora (2011)** *"Un celular del bosque"* publicado en [unajaponesaenjapon.com](http://unajaponesaenjapon.com)
- **NCSP (2007)** *"Norma Construcción Sismoresistente: Puentes"* Boletín oficial del estado (BOE) sábado 2 de junio 2007, Madrid.
- **Panopticons (2008)** *"Singing Ringing Tree"*. [midpenninearts.org.uk](http://midpenninearts.org.uk) Mid Pennine Arts, 1 Neptune Street, Weavers' Triangle.
- **Pedelta (2008)** "Puentes y pasarelas urbanos" Juan A. Sobrino Almunia, Javier Roldán García, [e-ache.com](http://e-ache.com)
- **Puertas Vici, Nanci (2009)**. *"El órgano de mar - Zadar"* Blog [culturacroata.com](http://culturacroata.com) publicado el 13 de marzo
- **Revista Mexico (1965)**. *"Como hacer un Arpa Eolia"* Mecánica Popular edición mexico, vol 37 num.2 Agosto
- **Rincon Abstracto (2012)** *"Carreteras que generan música con el paso de los automóviles"*. [rinconabstracto.com](http://rinconabstracto.com) publicado el 26 de enero
- **Rui-Wamba Martija, Javier (2008)** *"La innovación entra en juego"*. Ibermática Ingeniería y Construcciones. Presentación en Bilbao el 27 de noviembre.
- **Sétra (2006)** *"Technical guide. Footbridges. Assessment of vibrational behaviour of footbridges under pedestrian loading"* Ministère des Transports de l'Équipement du Tourisme et de la Mer.
- **National Annex (2003)** *"UK National Annex to Eurocode 1: Actions on structures. Part 2: Traffic loads"* British Standards
- **Vidal-Quadras, Cristina (2006)** *"Esculturas Sonoras Baschet : Cuerpo, Espiritu y Sonido"* web oficial hermanos Baschet